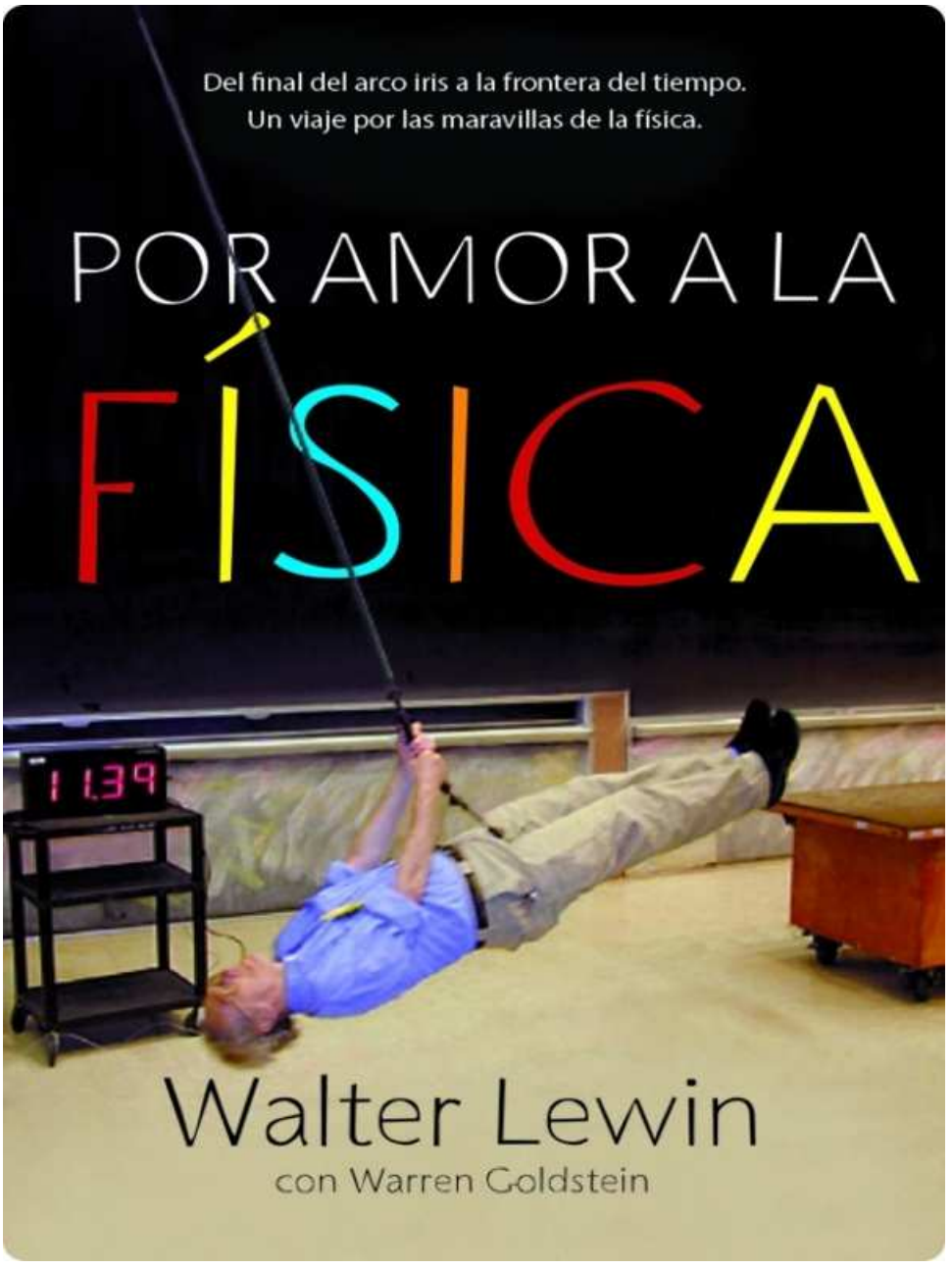
Del final del arco iris a la frontera del tiempo.
Un viaje por las maravillas de la física.

POR AMOR A LA FÍSICA



Walter Lewin

con Warren Goldstein

Introducción

Delgado y de casi metro noventa, con lo que parece ser una camisa de trabajo azul remangada hasta los codos, pantalones de dril de color caqui, sandalias y calcetines blancos, el profesor se mueve a grandes zancadas de un lado a otro de la tarima en la sala de conferencias declamando, gesticulando, parándose de vez en cuando para hacer énfasis en algún punto, entre una larga hilera de pizarras y una mesa de laboratorio que le llega por los muslos. Cuatrocientas sillas se elevan frente a él, ocupadas por estudiantes que se remueven en sus asientos pero mantienen la mirada fija en el profesor, que da la impresión de que apenas consigue contener la poderosa energía que recorre su cuerpo. Con su frente despejada, su mata de pelo gris alborotado, sus gafas y el deje de un acento europeo no identificable, recuerda al Doc Brown que interpretaba Christopher Lloyd en la película Regreso al futuro, el científico-inventor vehemente, visionario y un poco loco.

Pero no estamos en el garaje de Doc Brown, sino en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la universidad de ciencia e ingeniería más importante de Estados Unidos, quizá incluso de todo el mundo, y dando clase en la pizarra está el profesor Walter H. G. Lewin. Detiene sus pasos y se vuelve hacia la clase:

«Algo muy importante a la hora de hacer mediciones, que olvidan siempre todos los libros de texto universitarios de física —despliega los brazos, abriendo los dedos— es la imprecisión en vuestras mediciones».

Hace una pausa, da un paso, dejándoles tiempo para pensar, y se para de nuevo:

«Cualquier medida que toméis sin saber cuál es su imprecisión carece de significado».

Sus manos vuelan, cortando el aire para hacer énfasis en ello. Otra pausa.

«Lo repito. Quiero que lo oigáis esta noche a las tres de la madrugada cuando os despertéis.»

Aprieta los dedos índices contra las sienes, haciéndolos girar como si se taladrase el

cerebro.
«Cualquier medición que hagáis sin conocer su imprecisión carece por completo de significado.»

Los estudiantes lo observan con atención, completamente embelesados.
Solo llevamos once minutos de la primera clase de Física 8.01, el curso universitario de introducción a la física más famoso del mundo.
En diciembre de 2007 apareció en la portada del New York Times un artículo que calificaba a Walter Lewin como «estrella de la red» del MIT, en el que se hablaba de sus clases de física, disponibles en el sitio web OpenCourseWare[1] del MIT, así como en YouTube, iTunes U y Academic Earth. Las de Lewin fueron unas de las primeras clases que el MIT colgó en internet y la decisión fue un acierto. Han sido excepcionalmente populares. Las noventa y cuatro clases —tres cursos completos más siete clases independientes— tienen unos tres mil visionados al día, un millón al año. Incluidas varias visitas por el mismísimo Bill Gates, que ha visto todas las de los cursos
8.01: Mecánica Clásica, y
8.02: Electricidad y Magnetismo, si nos atenemos a las cartas (¡en correo postal!) que le envió a Walter, en las que le decía que estaba deseando pasar a
8.03: Vibraciones y Ondas.

«Ha cambiado mi vida» es una frase que suele encabezar los correos electrónicos que Lewin recibe a diario de gente de todas las edades y de todas las partes del mundo. Steve, un florista de San Diego, escribió: «Tengo renovados bríos y veo la vida con ojos teñidos de física». Mohamed, futuro estudiante de ingeniería en Túnez, escribió: «Por desgracia, aquí en mi país los profesores no aprecian como usted la belleza de la física y yo he sufrido mucho por ello. Solo quieren que aprendamos cómo resolver ejercicios "típicos" para aprobar el examen, no ven más allá de ese reducido horizonte». Seyed, un iraní que ya había cursado un par de

[1] OpenCourseWare (OCW) es una iniciativa educativa del MIT en internet, que desde 2001 publica de forma gratuita en su web materiales lectivos de algunos de sus cursos universitarios, facilitando el acceso libre a ellos por parte de todos los internautas. Tras el éxito del MIT, otras instituciones acometieron proyectos similares, entre las que cabe destacar las universidades de Stanford, Harvard, Berkeley o Yale. *(N. del T.)*

masters en Estados Unidos, escribió: «Nunca había disfrutado realmente de la vida hasta que le vi dar clase de física. Profesor Lewin, sin duda ha cambiado mi vida. Su manera de enseñar vale diez veces el coste de la matrícula y hace de ALGUNOS profesores, no todos, unos delincuentes. Enseñar mal es un DELITO MUY GRAVE». O Siddharth, de la India: «Pude sentir la física más allá de las ecuaciones. Sus alumnos siempre lo recordarán, y yo también, como un gran profesor que hizo que la vida y el aprendizaje fuesen más interesantes de lo que yo creí que era posible».

Mohamed cita con entusiasmo y aprobación la última clase de Lewin en Física 8.01: «Puede que siempre recordéis de mis clases que la física puede ser muy emocionante y hermosa y que nos rodea por todos lados, en todo momento, si somos capaces de aprender a verla y a apreciar su belleza». Marjory, otra admiradora, escribió: «Veo sus vídeos siempre que puedo; en ocasiones cinco veces a la semana. Me fascina su personalidad, su sentido del humor y, por encima de todo, su capacidad para simplificar las cosas. Odiaba la física en el instituto, pero usted ha hecho que me encante».

Lewin recibe decenas de correos como estos cada semana y los contesta todos.

Walter Lewin hace magia al presentar las maravillas de la física. ¿Cuál es su secreto?

«Le muestro a la gente su propio mundo —dice—, el mundo en el que viven y que conocen, pero que no miran como físicos... aún. Si hablo de ondas en el agua, les pido que hagan experimentos en sus bañeras; eso saben lo que es. Como también saben qué son los arcos iris. Es algo que me encanta de la física: puedes llegar a explicar cualquier cosa. ¡Consigo que les encante la física! A veces, cuando mis alumnos se implican de verdad, las clases casi parecen todo un acontecimiento.»

Puede subirse a una escalera de cinco metros y beber zumo de arándanos desde un vaso de precipitados colocado en el suelo con una pajita serpenteante hecha a base de tubos de laboratorio. O puede estar arriesgándose a sufrir una grave lesión al poner su cabeza en la trayectoria de una pequeña pero potente bola de demolición que se balancea a milímetros de su mejilla. Puede disparar con un rifle contra dos botes de pintura llenos de agua, o cargarse con 300.000 voltios de electricidad mediante un aparato de gran tamaño llamado generador de Van de Graaff —que

parece sacado del laboratorio de un científico loco de una película de ciencia ficción— con su pelo, ya habitualmente salvaje, totalmente de punta. Utiliza su cuerpo como parte del equipo experimental. Como suele decir: «Al fin y al cabo, la ciencia requiere sacrificios». En una demostración —que aparece en la cubierta de este libro— se sienta en una bola de metal extremadamente incómoda en el extremo de una cuerda que cuelga del techo de la sala de conferencias (que él llama la madre de todos los péndulos) y se balancea de un lado a otro mientras sus alumnos cuentan en voz alta el número de oscilaciones, todo con tal de demostrar que el número de oscilaciones que da un péndulo en un tiempo determinado es independiente del peso que tenga en su extremo.

Su hijo, Emanuel «Chuck» Lewin, ha asistido a algunas de estas clases y cuenta: «Una vez lo vi inhalar helio para cambiar la voz. Para conseguir que el efecto se produzca —la clave está en los detalles— normalmente llega casi a desmayarse». Consumado artista de la pizarra, Lewin dibuja con despreocupación figuras geométricas, vectores, gráficas, fenómenos astronómicos y animales. Su método para dibujar líneas de puntos les gustó tanto a unos alumnos que produjeron un gracioso vídeo en YouTube, titulado «Some of Walter Lewin's Best Lines» («Algunas de las mejores líneas de Walter Lewin»), que consistía simplemente en fragmentos de las clases de su curso 8.01 en los que Lewin dibujaba sus famosas líneas de puntos en distintas pizarras[2].

Dueño de una presencia dominante y carismática, Lewin es verdaderamente excéntrico: estrafalario y obsesionado por la física. Siempre lleva en su cartera dos aparatos llamados polarizadores para poder ver al instante si cualquier fuente de luz, ya sea el cielo, un arco iris o los reflejos en las ventanas, está polarizada, y que quienquiera que esté con él pueda verlo también.

¿Y esas camisas de trabajo azules que lleva a clase? Resulta que no son en absoluto camisas de trabajo. Se las hace a medida, en algodón de alta calidad, un sastre en Hong Kong; una decena de ellas cada pocos años. Lewin diseñó el enorme bolsillo en la parte izquierda para poder meter en él su agenda. Nada de protectores de bolsillos —este físico-artista-profesor es un hombre meticuloso en el vestir—, lo que le lleva a uno a preguntarse por qué parece que luce el broche más raro que jamás

[2] Lo puedes ver en www.youtube.com/watch?v=raurl4s0pjU

se le haya visto a un profesor de universidad: un huevo frito de plástico. «Mejor —dice— tener un huevo en mi camisa que en mi cara.»

¿Qué hace ese enorme anillo rosa de polimetilmetacrilato en su mano izquierda? ¿Y qué es esa cosa plateada sujeta a su camisa justo a la altura del ombligo, que no deja de mirar de reojo?

Cada mañana al vestirse, Lewin puede elegir entre cuarenta anillos y treinta y cinco broches, así como decenas de pulseras y collares. Sus gustos van desde lo ecléctico (pulseras kenianas de cuentas, un collar de grandes piezas de ámbar, broches de plástico con forma de frutas) a las antigüedades (un pesado brazalete de plata de Turkmenistán), pasando por la joyería creada por diseñadores y artistas o lo simple y cómicamente extravagante (un collar de pastillas de regaliz hechas de fieltro). «Los alumnos empezaron a fijarse en ellos —dice—, así que empecé a cambiarlos para cada clase. Y, sobre todo, cuando doy charlas a los niños. Les encanta.»

¿Y esa cosa enganchada a su camisa que parece un enorme pasador de corbata? Es un reloj especialmente diseñado (regalo de un amigo artista) con la esfera al revés para que Lewin pueda ver la hora solo con mirar hacia abajo.

A veces puede parecer que Lewin está distraído, el típico profesor despistado. Pero en realidad suele estar pensando profundamente sobre algún aspecto de la física. Como ha recordado recientemente su mujer, Susan Kaufman:

«Cuando vamos a Nueva York siempre conduzco yo. Pero hace poco, no sé por qué, saqué un mapa, y al hacerlo vi que los márgenes estaban llenos de ecuaciones. Hizo esos garabatos en los márgenes la última temporada que estuvo dando clase, porque se aburría mientras íbamos de viaje. No se sacaba la física de la cabeza. Tenía presentes a sus alumnos y su escuela veinticuatro horas al día».

Quizá lo más llamativo de la personalidad de Lewin, según su vieja amiga la historiadora de la arquitectura Nancy Stieber, es «la intensidad de su interés, como un láser. Siempre parece que se implica al máximo con lo que decide hacer y se olvida del 90 por ciento del mundo. Con esa concentración, como de láser, elimina lo que no le parece esencial, llegando a implicarse de una forma tan intensa que provoca una extraordinaria joie de vivre».

Lewin es un perfeccionista, tiene una obsesión casi fanática con los detalles. No es

solo el mejor profesor de física del mundo, también fue pionero en el campo de la astronomía de rayos X y dedicó dos décadas a construir, probar y observar fenómenos subatómicos y astronómicos con equipos ultrasensibles diseñados para medir rayos X con un grado de precisión extraordinario. Lanzando globos enormes y extremadamente delicados que rozaban el límite superior de la atmósfera terrestre, empezó a descubrir una exótica variedad de fenómenos astronómicos, como las erupciones de rayos X. Los descubrimientos que sus colegas y él hicieron en este campo contribuyeron a esclarecer la naturaleza de la muerte de las estrellas en gigantescas explosiones de supernovas y a verificar que los agujeros negros existen realmente.

Aprendió a hacer pruebas, pruebas y más pruebas, lo que no solo se traduce en su éxito como astrofísico experimental, sino también en la notable claridad con la que revela la majestuosidad de las leyes de Newton, por qué las cuerdas de un violín producen unas notas resonantes tan hermosas, y por qué pierdes y ganas peso, aunque sea muy brevemente, cuando montas en un ascensor.

Para sus clases siempre ensayaba al menos tres veces en un aula vacía, haciendo el último ensayo a las cinco de la mañana del día de la clase. «Lo que hace que sus clases funcionen —dice el astrofísico David Pooley, un antiguo alumno que trabajó con él en el aula— es el tiempo que les dedica.»

Cuando el Departamento de Física del MIT nominó a Lewin para un prestigioso premio de docencia en 2002, muchos colegas destacaron estas mismas cualidades. Una de las descripciones más evocadoras de la experiencia de aprender física con Lewin es la de Steven Leeb, hoy profesor de ingeniería eléctrica e informática en el Laboratorio de Sistemas Electromagnéticos y Electrónicos del MIT, que cursó su asignatura de Electricidad y Magnetismo en 1984. «Explotaba en el escenario —recuerda Leeb—, nos agarraba por el cerebro y nos llevaba a una montaña rusa de electromagnetismo que aún puedo sentir en la nuca. Es un genio en el aula, con un abanico de recursos sin parangón para encontrar la forma de simplificar los conceptos.»

Robert Hulsizer, uno de los colegas de Lewin en el Departamento de Física, intentó resumir en vídeo algunas de las demostraciones de las clases de Lewin para hacer una especie de película con sus mejores momentos destinada a los alumnos de

otras universidades. Se dio cuenta de que era imposible. «Las demostraciones están tan bien hilvanadas con el desarrollo de las ideas, incluidos el aumento de la tensión y el desenlace, que no era posible identificar el momento preciso en que empezaba o terminaba una demostración. Para mí, la riqueza de las presentaciones de Walter es tal que no pueden dividirse en pedazos.»

Lo emocionante de la forma con que Walter Lewin presenta las maravillas de la física es la gran alegría que transmite sobre los prodigios de nuestro mundo. Su hijo Chuck recuerda con cariño el entusiasmo con que su padre transmitía esa sensación de alegría a sus hermanos y a él:

«Tiene la capacidad de hacer que veas las cosas y que te sobrecojas con su hermosura, de generar en ti alegría, asombro y emoción. Me refiero a las increíbles ventanas que abría para ti, a los momentos que provocaba, que hacían que te sintieras feliz de estar vivo y a su lado. Una vez estábamos de vacaciones en Maine. Recuerdo que no hacía muy buen tiempo y los niños estábamos simplemente pasando el rato, como suelen hacer los niños, aburridos. Mi padre sacó de algún sitio una pequeña pelota y espontáneamente se inventó un jueguecito extraño; un minuto después, varios niños de la casa de al lado se acercaron y de pronto éramos cuatro, cinco o seis riendo mientras nos lanzábamos y recogíamos la pelota. Recuerdo haberme sentido emocionado y contento. Si hago memoria y pienso en qué es lo que me ha motivado en la vida, veo que es tener momentos de alegría pura como esos, saber lo buena que puede llegar a ser la vida, todo lo que puede ofrecer. Eso lo he aprendido de mi padre.»

Walter solía organizar en invierno un juego para sus hijos en el que probaban la calidad aerodinámica de unos aviones de papel, lanzándolos contra la gran chimenea del salón. «Para horror de mi madre —recuerda Chuck—, los salvábamos del fuego. ¡Queríamos ganar la siguiente ronda como fuese!»

Cuando venían invitados a cenar, Walter dirigía el juego del viaje a la Luna. Chuck lo recuerda así: «Bajábamos las luces y aporreábamos la mesa con los puños en un redoble, simulando el ruido del lanzamiento de un cohete. Algunos de los niños incluso se metían bajo la mesa y daban golpes. Después, cuando llegábamos al espacio, dejábamos de golpear y, una vez que alunizábamos, todos nos movíamos

por el salón como si hubiese muy poca gravedad, dando pasos disparatadamente exagerados. Mientras, los invitados debían de pensar: «¡Esta gente está loca!». Pero para nosotros, los niños, ¡era fantástico! ¡Ir a la Luna!».

Walter Lewin ha llevado alumnos a la Luna desde que entró por primera vez en un aula hace más de medio siglo. Perpetuamente extasiado con el misterio y la belleza del mundo natural —de los arcos iris a las estrellas de neutrones, de un fémur de ratón a los sonidos de la música— y por los intentos de científicos y artistas de explicar, interpretar y representar el mundo, Walter Lewin es uno de los guías científicos más apasionados, entusiastas y capaces que existen. En los capítulos siguientes podrás experimentar su pasión, entusiasmo y capacidad a medida que va desvelando y compartiendo contigo su amor de toda una vida por la física. ¡Disfruta del recorrido!

Warren Goldstein

Capítulo 1

Del núcleo al espacio profundo

Es realmente asombroso. Mi abuelo materno era analfabeto, trabajaba de celador y, dos generaciones después, yo soy catedrático en el MIT. Le debo mucho al sistema educativo holandés: hice el doctorado en la Universidad Tecnológica de Delft, en los Países Bajos, y maté tres pájaros de un tiro.

Desde el principio empecé a impartir clases de física. Para pagar la matrícula tuve que pedir un préstamo al gobierno holandés y, si daba clases a jornada completa, al menos veinte horas a la semana, cada año el gobierno me perdonaba una quinta parte de la deuda. Otra ventaja de dar clase era que no tendría que hacer el servicio militar. El ejército habría sido lo peor, un desastre absoluto para mí. Soy alérgico a cualquier forma de autoridad —es un rasgo de mi personalidad— y sabía que habría acabado hablando más de la cuenta y fregando suelos. Así que enseñaba matemática y física a tiempo completo, veintidós horas de clase a la semana, en el Liceo Libanon de Rotterdam, a alumnos de dieciséis y diecisiete años. Me libré del ejército, no tuve que devolver el préstamo y me estaba sacando el doctorado, todo a la vez.

También aprendí a dar clase. Para mí, era emocionante enseñar a alumnos de instituto y poder ejercer una influencia positiva sobre las mentes de chicos jóvenes. Siempre traté de que las clases fueran interesantes pero también divertidas para los alumnos, a pesar de que el centro era bastante estricto: las puertas del aula tenían montantes en su parte superior y uno de los jefes de estudios solía subirse a una silla y espiar a los profesores a través de ellos. ¿Te lo puedes creer?

La cultura del centro no me convencía y, como buen estudiante de doctorado, rebosaba entusiasmo. Mi objetivo era transmitir ese entusiasmo a mis alumnos, ayudarles a ver la belleza del mundo que les rodeaba de una forma distinta, transformarlos para que ellos también apreciasen la belleza del mundo de la física y entendiesen que la física está en todas partes, permea nuestras vidas. Me di cuenta de que lo importante no son los temas que tratas, sino lo que descubres. Exponer en clase teorías acabadas puede ser algo aburrido y los alumnos lo notan. Descubrir

las leyes de la física y conseguir que vean a través de las ecuaciones, sin embargo, revela el proceso de descubrimiento, con toda su novedad y emoción, y a los alumnos les encanta participar en él.

Tuve oportunidad de hacerlo también, de una forma distinta, muy lejos de las aulas. Cada año, la escuela patrocinaba unas vacaciones de una semana en las que un profesor se llevaba a los chicos de acampada a un lugar bastante remoto y primitivo. Mi ex mujer, Huibertha, y yo lo hicimos una vez y nos encantó. Cocinábamos todos juntos y dormíamos en tiendas de campaña. Entonces, como estábamos muy lejos de las luces de la ciudad, despertábamos a los chicos a medianoche, les dábamos chocolate caliente y les sacábamos a ver las estrellas. Identificábamos constelaciones y planetas y podían contemplar la Vía Láctea en todo su esplendor.

No estaba estudiando, ni siquiera enseñando, astrofísica —de hecho, estaba diseñando experimentos para detectar algunas de las partículas más pequeñas del universo—, pero siempre me ha fascinado la astronomía. Lo cierto es que a casi todos los físicos del planeta les encanta la astronomía. Muchos físicos que conozco construyeron sus propios telescopios cuando estaban en secundaria. Mi viejo amigo y colega en el MIT George Clark esmeriló y pulió un espejo de 15 centímetros para un telescopio cuando estaba en el instituto. ¿Por qué les gusta tanto la astronomía a los físicos? Por una parte, muchos de los avances de la física —las teorías sobre el movimiento orbital, por ejemplo— han sido resultado de dudas, observaciones y teorías astronómicas. Por otra, la astronomía es física, escrita a gran escala sobre el cielo nocturno: eclipses, cometas, estrellas fugaces, cúmulos globulares, estrellas de neutrones, erupciones de rayos gamma, chorros, nebulosas planetarias, supernovas, cúmulos de galaxias, agujeros negros.

Basta con que mires al cielo y te hagas unas preguntas obvias: ¿Por qué el cielo es azul, los atardeceres rojos y las nubes blancas? ¡La física tiene las respuestas! La luz solar se compone de todos los colores del arco iris, pero a medida que atraviesa la atmósfera se dispersa en todas direcciones al chocar con las moléculas del aire y con minúsculas partículas de polvo (mucho más pequeñas que una micra, que es una diezmilésima de centímetro). Es lo que se conoce como dispersión de Rayleigh. La luz azul es la que más se dispersa, unas cinco veces más que la roja. Por tanto,

cuando miras al cielo durante el día en cualquier dirección[3] predomina el azul y por eso tiene ese color. Si miras al cielo desde la superficie de la Luna (quizá hayas visto fotografías), no es azul, sino negro, como el nuestro por la noche. ¿Por qué? Porque la Luna no tiene atmósfera.

¿Por qué son rojos los atardeceres? Justamente por la misma razón por la que el cielo es azul. Cuando el Sol está en el horizonte, sus rayos deben recorrer una mayor distancia a través de la atmósfera y la luz verde, azul y violeta se dispersa más y resulta prácticamente filtrada. Cuando la luz llega a nuestros ojos —y a las nubes que tenemos encima— está compuesta en su mayor parte de amarillo, naranja y, sobre todo, rojo. Por eso, al amanecer y al atardecer, a veces casi parece que el cielo está ardiendo.

¿Por qué son blancas las nubes? Las gotas de agua en las nubes son mucho más grandes que las diminutas partículas que hacen que nuestro cielo sea azul y, cuando la luz se dispersa a través de estas partículas mucho más grandes, todos los colores se dispersan en la misma medida. Pero si una nube está muy cargada de humedad, o a la sombra de otra nube, la atravesará poca luz y la nube se oscurecerá.

Una de las demostraciones que me gusta hacer en clase es crear un pedazo de «cielo azul». Apago todas las luces y apunto hacia el techo del aula, cerca de la pizarra, con un foco de luz blanca muy brillante, cuidadosamente protegido. A continuación, enciendo unos cuantos cigarrillos y los coloco en el haz de luz. Las partículas de humo son lo suficientemente pequeñas como para producir dispersión de Rayleigh y, como la luz azul es la que más se dispersa, los alumnos ven humo azul. Después doy un paso más: inhalo el humo y lo mantengo en mis pulmones alrededor de un minuto. No siempre es fácil, pero la ciencia a veces requiere sacrificios. Exhalo el humo sobre el haz de luz y los alumnos ven entonces humo blanco: ¡he creado una nube blanca! Las diminutas partículas de humo se han creado en mis pulmones, donde hay mucho vapor de agua, así que ahora todos los colores se dispersan por igual y la luz resultante es blanca. ¡El cambio de color de la luz del azul al blanco es realmente asombroso!

Con esta demostración consigo responder dos preguntas en una: ¿Por qué es azul el cielo y por qué son blancas las nubes? De hecho, hay una tercera cuestión muy

[3] Tened cuidado: nunca miréis directamente al Sol.

interesante que tiene que ver con la polarización de la luz, de la que hablaré en el capítulo 5.

En el campo, podía mostrarles a mis alumnos la galaxia de Andrómeda, la única que se puede ver a simple vista, a unos 2,5 millones de años luz (24 trillones de kilómetros), lo que, en distancias astronómicas, es como la casa de al lado. Está compuesta por unos 200.000 millones de estrellas. Imagínatelo: 200.000 millones de estrellas y solo podíamos ver una tenue mancha borrosa. También veíamos un montón de meteoros (la mayoría de la gente los llama estrellas fugaces). Si tenías paciencia, podías observar uno cada cuatro o cinco minutos. En aquella época no los había, pero ahora verías también unos cuantos satélites. Hay más de 2.000 orbitando alrededor de la Tierra y, si mantienes la vista fija durante cinco minutos, casi seguro que verás uno, sobre todo unas pocas horas después del atardecer o antes del amanecer, cuando el Sol aún no se ha puesto o todavía no ha salido sobre el propio satélite y la luz solar aún se refleja sobre él. Cuanto más lejos está el satélite, y mayor es por tanto la diferencia entre el momento en que el Sol se pone en la Tierra y en el satélite, más tarde por la noche se puede ver. Los satélites se reconocen porque se mueven más rápido que cualquier otra cosa en el cielo (salvo los meteoros); si parpadea, créeme, es un avión.

Siempre me ha gustado especialmente mostrar Mercurio a la gente cuando estamos viendo las estrellas. Al ser el planeta más cercano al Sol, es muy difícil verlo a simple vista. Las mejores condiciones se dan unas pocas semanas al año, por la mañana y por la noche. Mercurio órbita alrededor del Sol en solo ochenta y ocho días, razón por la cual se le puso el nombre del mensajero con pies alados de los dioses romanos. Es tan difícil de ver porque su órbita es muy cercana al Sol: nunca está a más de unos 25 grados de distancia del Sol cuando lo miramos desde la Tierra (un ángulo menor que el que forman las dos manecillas del reloj a las once en punto). Solo se puede ver poco después de la puesta del Sol y antes del amanecer, y cuando está a una mayor distancia del Sol, visto desde la Tierra. En Estados Unidos siempre está cerca del horizonte; casi hace falta estar en el campo para verlo. ¡Qué maravilla cuando consigues encontrarlo!

Mirar a las estrellas nos pone en contacto con la inmensidad del universo. Si seguimos mirando al cielo nocturno y dejamos que nuestros ojos se adapten

durante un tiempo suficiente, podemos ver perfectamente la superestructura de los confines de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea: de 100.000 a 200.000 millones de estrellas unidas como por un tejido diáfano y deliciosamente delicado. El tamaño del universo es inabarcable, pero para hacerte una idea puedes empezar pensando primero en la Vía Láctea.

Nuestra estimación actual es que puede haber tantas galaxias en el universo como estrellas en nuestra propia galaxia. De hecho, cuando un telescopio observa el espacio profundo, lo que ve son sobre todo galaxias —es imposible distinguir las estrellas a distancias realmente grandes—, cada una con miles de millones de estrellas. Recuerda también el reciente descubrimiento de la mayor estructura en el universo conocido, la Gran Muralla de galaxias, identificada por el Sloan Digital Sky Survey, un importante proyecto que ha aunado los esfuerzos de más de trescientos astrónomos e ingenieros y veinticinco universidades y centros de investigación. Desde que se puso en funcionamiento en el año 2000, el telescopio Sloan se pasa todas las noches observando, y así seguirá al menos hasta el año 2014. La Gran Muralla tiene una longitud de más de 1.000 millones de años luz. ¿Te empieza a dar vueltas la cabeza? Si no es así, ten en cuenta que el universo observable (no todo, solo la parte que podemos observar) tiene aproximadamente unos 90.000 millones de años luz de ancho.

Este es el poder de la física: puede decirnos que el universo observable está compuesto de unos 100.000 millones de galaxias. También puede decirnos que, de toda la materia en el universo visible, solo alrededor del 4 por ciento es materia ordinaria, de la que están formadas las estrellas y las galaxias (y tú y yo). Alrededor del 23 por ciento es lo que se denomina materia oscura (invisible). Sabemos que existe, pero no sabemos qué es. El 73 por ciento restante, el grueso de la energía en nuestro universo, es la llamada energía oscura, que también es invisible. Y nadie tiene ni idea de lo que es. La conclusión es que ignoramos qué es el 96 por ciento de la masa/energía del universo. La física ha explicado muchas cosas, pero aún nos quedan muchos misterios por resolver, algo que a mí me resulta muy sugerente.

La física explora la inmensidad inimaginable, pero al mismo tiempo puede adentrarse en los dominios más minúsculos, hasta trozos de materia como los neutrinos, del tamaño de una diminuta fracción de un protón. A eso dedicaba la

mayor parte de mi tiempo en mis primeros días como físico, a los reinos de lo muy pequeño, midiendo y trazando gráficos de la emisión de partículas y radiación desde núcleos radiactivos. Era física nuclear, pero no de la que se dedica a construir bombas: estaba estudiando la base del funcionamiento de la materia a un nivel realmente fundamental.

Probablemente ya sabes que casi toda la materia que puedes ver y tocar está compuesta por elementos como hidrógeno, oxígeno o carbono, que se combinan en moléculas, y que la unidad más pequeña de un elemento es el átomo, compuesto por un núcleo y electrones. El elemento más ligero y abundante en el universo, el hidrógeno, tiene un protón y un electrón. Pero existe una forma de hidrógeno que tiene también un neutrón en su núcleo. Se trata de un isótopo del hidrógeno, una forma distinta del mismo elemento llamada deuterio. Existe incluso un tercer isótopo del hidrógeno, con dos neutrones junto al protón en el núcleo: el tritio. Todos los isótopos de un elemento tienen el mismo número de protones pero diferente cantidad de neutrones, y los elementos tienen distinto número de isótopos. Hay trece isótopos del oxígeno, por ejemplo, y treinta y seis isótopos del oro.

Ahora bien, muchos de estos isótopos son estables, es decir, perduran más o menos para siempre, pero la mayoría son inestables, otra forma de decir que son radiactivos. Los isótopos radiactivos se desintegran, esto es, tarde o temprano se transforman en otros elementos. Algunos de los elementos en los que se transforman son estables y la desintegración radiactiva se detiene, pero otros son inestables, y la desintegración continúa hasta alcanzar un estado estable. De los tres isótopos del hidrógeno, solo uno, el tritio, es radiactivo: se desintegra en un isótopo estable del helio. De los trece isótopos del oxígeno, tres son estables; de los treinta y seis del oro, solo uno es estable.

Probablemente recuerdes que medimos la velocidad de desintegración de los isótopos radiactivos por su «vida media», que puede ir desde un microsegundo (una millonésima de segundo) a miles de millones de años. Cuando decimos que el tritio tiene una vida media de unos doce años, queremos decir que, en una muestra de tritio, la mitad de los isótopos se desintegrarán en doce años (solo quedará una cuarta parte cuando hayan transcurrido veinticuatro años). La desintegración

nuclear es uno de los procesos más importantes de transformación y creación de muchos elementos. No es alquimia. De hecho, durante mi investigación para el doctorado, a menudo vi cómo isótopos radiactivos del oro se desintegraban en mercurio, y no al revés, como les habría gustado a los alquimistas medievales. Sin embargo, hay muchos isótopos del mercurio, y también del platino, que se desintegran en oro. Pero solo un isótopo del platino y otro del mercurio se desintegran en oro estable, del que puedes llevar en el dedo.

Mi trabajo era tremendamente emocionante: los isótopos radiactivos se desintegraban literalmente en mis manos. Y muy intenso: los isótopos con los que trabajaba tenían normalmente vidas medias de uno o unos pocos días. El oro 198, por ejemplo, tiene una vida media de poco más de dos días y medio, por lo que tenía que darme prisa. Conducía de Delft a Amsterdam, donde generaban estos isótopos en un ciclotrón, y volvía rápidamente al laboratorio en Delft, donde disolvía los isótopos en ácido para pasarlos a forma líquida, los ponía sobre una película muy delgada y los colocaba en detectores.

Estaba intentando verificar una teoría sobre la desintegración nuclear que predecía la proporción entre los rayos gamma y la emisión de electrones desde el núcleo y necesitaba hacer mediciones precisas. Este trabajo ya se había hecho con muchos isótopos radiactivos, pero recientemente habían aparecido algunos resultados que no cuadraban con lo que la teoría predecía. Mi director de tesis, el profesor Aaldert Wapstra, me sugirió que tratase de determinar si el problema era de los resultados o de la teoría. Fue algo enormemente satisfactorio, como trabajar con un puzle muy complicado. El reto consistía en que mis mediciones tenían que ser mucho más precisas que las que habían hecho otros investigadores antes.

Los electrones son tan pequeños que hay quien dice que no tienen tamaño efectivo (su grosor es de menos de una milbillonésima de centímetro) y los rayos gamma tienen una longitud de onda de menos de una milmillonésima de centímetro. Y, aun así, la física me ofreció los medios para detectarlos y contarlos. Es otra de las cosas que más me gusta de la física experimental: nos permite «tocar» lo invisible.

Para realizar las mediciones que necesitaba, tuve que exprimir la muestra todo lo que pude, porque cuantos más recuentos hiciese mayor sería la precisión. Con frecuencia trabajaba unas sesenta horas seguidas, a menudo sin dormir. Estaba un

poco obsesionado.

Para un físico experimental, la precisión es la clave de todo. La exactitud es lo único que importa y una medición que no va acompañada de su grado de precisión no tiene sentido. Los libros de texto universitarios sobre física olvidan casi siempre esta idea simple, potente y absolutamente fundamental. Conocer el grado de precisión es esencial para muchas cosas en la vida.

En mi trabajo con isótopos radiactivos, conseguir el grado de precisión que necesitaba alcanzar era muy difícil, pero a lo largo de tres o cuatro años fui mejorando mis habilidades de medición. Después de hacer mejoras en algunos de los detectores, resultó que eran muy precisos. Estaba confirmando la teoría y publicando mis resultados, y este trabajo acabó siendo mi tesis doctoral. Lo que resultó especialmente gratificante para mí fue que mis resultados eran bastante concluyentes, algo que no suele suceder. A menudo, en la física y en la ciencia en general, los resultados no son siempre claros, pero yo tuve la suerte de llegar a una conclusión firme. Había resuelto un puzle, me había consagrado como físico y había contribuido a describir el territorio desconocido del mundo subatómico. Tenía veintinueve años y estaba encantado de hacer una contribución sólida. No todos estamos destinados a hacer descubrimientos de la importancia y trascendencia de Newton y Einstein, pero aún queda mucho territorio por explorar.

También tuve la suerte de que, para cuando obtuve mi título, estaba comenzando una nueva era de descubrimientos sobre la naturaleza del universo. Los astrónomos estaban realizando descubrimientos a un ritmo asombroso. Algunos estaban examinando las atmósferas de Marte y Venus, buscando vapor de agua. Otros habían descubierto los cinturones de partículas cargadas que circulan por las líneas del campo magnético de la Tierra, lo que ahora llamamos cinturones de Van Allen. Otros habían descubierto enormes y potentes fuentes de ondas de radio conocidas como cuásares (fuentes de radio cuasi estelares). En 1965 se descubrió la radiación de fondo de microondas (CMB: cosmic microwave background), los vestigios de la energía que emitió el big bang, prueba contundente de esta teoría sobre el origen del universo, que había sido objeto de controversia. Poco después, en 1967, los astrónomos descubrirían una nueva categoría de estrellas a las que llamaron púlsares.

Podría haber seguido trabajando en física nuclear, porque también en ese campo se estaban produciendo muchos descubrimientos. Sobre todo en la persecución y descubrimiento de un creciente zoo de partículas subatómicas, las más importantes de las cuales eran los quarks, que resultaron ser los elementos que forman los protones y los neutrones. El abanico de comportamientos de los quarks es tan extraño que, para clasificarlos, los físicos les asignaron lo que llamaron sabores: arriba, abajo, extraño, encanto, cima y fondo. El descubrimiento de los quarks fue uno de esos hermosos momentos en la ciencia en que se confirma una idea puramente teórica. Los físicos teóricos habían predicho los quarks y los físicos experimentales lograron encontrarlos. Eran realmente muy exóticos, pues revelaban que los cimientos de la materia eran mucho más complicados de lo que sabíamos. Por ejemplo, ahora sabemos que los protones constan de dos quarks arriba y uno abajo ligados por la interacción nuclear fuerte, en forma de otras partículas extrañas denominadas gluones. Algunos teóricos han calculado recientemente que el quark arriba parece tener una masa de alrededor del 0,2 por ciento de la del protón, mientras que el quark abajo tiene una masa de aproximadamente el 0,5 por ciento de la del protón. Este ya no era el núcleo que conocieron nuestros abuelos.

Estoy seguro de que el zoo de partículas habría sido un área de investigación fascinante en la que adentrarse, pero, por un feliz accidente, las habilidades que desarrollé para medir la radiación emitida por el núcleo resultaron ser extremadamente útiles para explorar el universo. En 1965 recibí una invitación del profesor Bruno Rossi, del MIT, para trabajar en astronomía de rayos X, un campo completamente nuevo, con apenas unos pocos años de historia (Rossi lo había iniciado en 1959).

El MIT fue lo mejor que me pudo pasar. El trabajo de Rossi sobre rayos cósmicos ya entonces era legendario. Había liderado un departamento en Los Álamos durante la guerra y había sido pionero en la medición del viento solar, también llamado plasma interplanetario: un flujo de partículas cargadas que emite el Sol, el causante de nuestra aurora boreal y que «sopla» sobre las colas de los cometas alejándolas del Sol. Ahora tenía la intención de buscar rayos X en el cosmos. Era un trabajo completamente exploratorio, no tenía ni idea de si los encontraría o no.

Cualquier cosa se permitía entonces en el MIT. Podías trabajar en cualquier idea que

se te ocurriese, con tal de que convencieses a la gente de que era factible. ¡Menuda diferencia con los Países Bajos! En Delft, la jerarquía era rígida y a los estudiantes de doctorado se les trataba como una clase inferior. Los profesores tenían la llave de la puerta principal de mi edificio, pero a un estudiante de doctorado solo le daban la llave de la puerta del sótano, donde se guardaban las bicicletas. Cada vez que entrabas en el edificio tenías que pasar por los almacenes de bicicletas y recordar que eras un don nadie.

Si querías trabajar después de las cinco, tenías que rellenar un formulario, cada día, a las cuatro de la tarde, justificando por qué debías quedarte hasta tarde, cosa que yo tenía que hacer casi siempre. La burocracia era un verdadero incordio.

Los tres catedráticos que dirigían mi instituto tenían plazas de aparcamiento reservadas junto a la puerta principal. Uno de ellos, mi propio tutor, trabajaba en Amsterdam y venía a Delft solo una vez a la semana, los martes. Un día le pregunté: «¿Te importaría que ocupase tu plaza cuando no estás aquí?». «Por supuesto que no me importaría», me respondió, pero el primer día que aparqué allí me llamaron por megafonía y me ordenaron, de la forma más categórica, que quitase el coche. Otro ejemplo: como tenía que ir a Amsterdam a recoger mis isótopos, me permitían gastar 25 céntimos en un café y 1,25 florines en la comida (en aquella época, esto era más o menos un tercio de dólar), pero tenía que presentar recibos separados de cada cosa. Pregunté si podía añadir los 25 céntimos a la comida y entregar un solo recibo por 1,50 florines. El jefe del departamento, el profesor Blaisse, me escribió una carta en la que me decía que si quería comer como un gourmet podía hacerlo, pero que yo correría con los gastos.

Qué diferencia fue llegar al MIT y librarme de todo eso; me sentí como si renaciera. Todo se hacía para estimularte. Me dieron la llave de la puerta principal y podía trabajar en mi despacho cuando quisiese, de día o de noche. Para mí, la llave del edificio era como la llave para todo. El director del Departamento de Física me ofreció un puesto de profesor a los seis meses de llegar, en junio de 1966. Lo acepté y nunca me fui.

Llegar al MIT fue tan estimulante también porque había vivido la devastación de la Segunda Guerra Mundial. Los nazis habían asesinado a la mitad de mi familia, una tragedia que aún no he asumido realmente. Muy rara vez hablo de ello porque me

resulta muy difícil. Han pasado más de sesenta y cinco años y sigue siendo algo que me sobrepasa. Casi siempre que mi hermana Bea y yo hablamos de ello acabamos llorando.

Nací en 1936 y tenía solo cuatro años cuando los alemanes atacaron los Países Bajos, el 10 de mayo de 1940. En uno de mis primeros recuerdos estamos todos nosotros, mis abuelos maternos, mi madre, mi padre, mi hermana y yo, escondidos en el cuarto de baño de nuestra casa (en el número 61 de Amandelstraat, en La Haya) cuando las tropas nazis invadieron nuestro país. Nos pusimos pañuelos húmedos en la nariz, porque nos habían advertido de que habría ataques con gas.

La policía holandesa secuestró de su casa a mis abuelos judíos, Gustav Lewin y Emma Lewin Gottfeld, en 1942. Aproximadamente en ese mismo momento, se llevaron a Julia, la hermana de mi padre, su marido Jacob (de nombre de pila, Jenno), y sus tres hijos (Otto, Rudi y Emmie), los subieron en camiones, con sus maletas, y los mandaron a Westerbork, el campo de tránsito en Holanda. Más de cien mil judíos pasaron por Westerbork camino de otros campos. Los nazis enseguida enviaron a mis abuelos a Auschwitz y los asesinaron —con gas— el día que llegaron, el 19 de noviembre de 1942. Mi abuelo tenía setenta y cinco años, la misma edad que mi abuela, por lo que no habrían sido candidatos para los campos de trabajo. Westerbork, por cierto, era muy raro: parecía un complejo turístico para judíos. Había espectáculos de ballet y tiendas. Mi madre hacía a menudo tortitas de patata y se las enviaba por correo a nuestros familiares en Westerbork.

Como mi tío Jenno era lo que los holandeses llaman un statenloos, «apátrida» —no tenía nacionalidad—, consiguió quedarse en Westerbork con su familia durante casi un año antes de que los nazis los separaran y los enviasen a campos distintos. A mi tía Julia y a mis primas Emmie y Rudi las mandaron primero al campo de concentración para mujeres de Ravensbrück, en Alemania, y después a Bergen-Belsen, también en Alemania, donde permanecieron cautivas hasta que terminó la guerra. Mi tía Julia murió diez días después de la liberación del campo por los Aliados, pero mis primas sobrevivieron. Mi primo Otto, el mayor, también había sido enviado a Ravensbrück, al campo para hombres, y casi al final de la guerra acabó en el campo de concentración de Sachsenhausen; sobrevivió a la «marcha de la muerte» de Sachsenhausen en abril de 1945. Al tío Jenno lo mandaron

directamente a Buchenwald, donde lo asesinaron junto a otras 55.000 personas.

Cuando veo una película sobre el Holocausto, algo que tardé mucho en hacer, inmediatamente la proyecto sobre mi familia. Por eso La vida es bella me resultó terriblemente difícil de ver, incluso desagradable. No me cabía en la cabeza que se hiciesen bromas sobre algo tan serio. Aún sigo teniendo pesadillas en las que me persiguen los nazis y a veces me despierto totalmente aterrorizado. Una vez, incluso, presencié en sueños mi propia ejecución por los nazis.

Algún día me gustaría hacer el recorrido, el último recorrido de mis abuelos paternos, desde la estación de tren hasta las cámaras de gas en Auschwitz. No sé si llegaré a hacerlo, pero me parece una forma de rendirles homenaje. Contra tamaña monstruosidad, puede que los pequeños gestos sean todo lo que tenemos. Eso, y nuestra negativa a olvidar: nunca digo que mis familiares «murieron» en campos de concentración; siempre utilizo la palabra «asesinados», para no permitir que el lenguaje oculte la realidad.

Mi padre era judío pero mi madre no y, como judío casado con una mujer no judía, no fue un objetivo inmediato. Pero en 1943 ya sí lo era. Recuerdo que él tenía que llevar la estrella amarilla. Mi madre, mi hermana y yo no, pero él sí. No le prestamos mucha atención, al menos al principio. La llevaba algo escondida, bajo la ropa, cosa que estaba prohibida. Lo verdaderamente aterrador fue la manera gradual en que se acomodó a las restricciones de los nazis, que cada vez eran peores. Primero se le prohibió usar el transporte público. Luego no podía entrar en los parques públicos. Después no podía entrar en los restaurantes. ¡Pasó a ser persona non grata en los sitios que había frecuentado durante años! Y lo increíble era la capacidad de la gente para adaptarse.

Cuando ya no podía usar el transporte público, decía: «Bueno, ¿cuándo uso yo el transporte público?». Cuando ya no podía entrar en los parques públicos, decía: «Bueno, ¿cuándo voy yo a los parques públicos?». Después, cuando ya no podía ir a un restaurante, decía: «Bueno, ¿cuándo voy yo a restaurantes?». Trataba de hacer que esas cosas horribles pareciesen triviales, como pequeñas incomodidades, quizá por el bien de sus hijos, y quizá también para su propia paz interior. No lo sé.

Sigue siendo uno de los temas de los que más me cuesta hablar. ¿Por qué esa capacidad para ver cómo el agua va subiendo lentamente sin aceptar que acabará

ahogándote? ¿Cómo es posible que lo viesen y al mismo tiempo no lo viesen? Es algo que no consigo aceptar. Desde luego, en cierto sentido es totalmente comprensible: puede que sea la única forma de sobrevivir, mientras consigas seguir engañándote.

Aunque los nazis prohibieron que los judíos entrasen en los parques públicos, mi padre podía ir a los cementerios. Aún hoy recuerdo muchos paseos con él por un cementerio cercano. Fantaseábamos sobre cómo y por qué habrían muerto nuestros familiares (a veces llegaron a morir cuatro el mismo día). Aún pienso en eso hoy cuando paseo por el famoso cementerio de Mount Auburn en Cambridge.

Lo más trágico que me sucedió durante mi infancia fue que de repente mi padre desapareció. Recuerdo perfectamente el día que se fue. Volví a casa del colegio y por alguna razón sentí que no estaba. Mi madre estaba fuera, así que le pregunté a nuestra niñera, Lenie: *«¿Dónde está papá?»*, y obtuve una respuesta supuestamente tranquilizadora, pero de alguna forma supe que mi padre se había ido.

Bea vio cómo se iba, pero no me lo dijo hasta muchos años después. Por seguridad, los cuatro dormíamos en la misma habitación y a las cuatro de la mañana vio cómo se levantaba y metía ropa en una bolsa. Después le dio un beso a mi madre y se fue. Mi madre no sabía adónde iba. Habría sido muy peligroso que lo supiera, porque los alemanes podrían haberla torturado para averiguar dónde estaba mi padre. Ahora sabemos que la Resistencia lo escondió y un tiempo después recibimos mensajes suyos a través de ellos, pero en ese momento era terrible no saber dónde estaba o ni siquiera tener la certeza de si estaba vivo.

Yo era demasiado joven como para entender hasta qué punto su ausencia afectó a mi madre. Mis padres habían montado un colegio en nuestra casa —lo que sin duda influyó mucho en mi amor por la enseñanza— y ella se las vio y se las deseó para seguir adelante sin él. Ya de natural tenía tendencias depresivas, pero ahora su marido se había ido y temía que mandasen a sus hijos a un campo de concentración. Seguro que estaba realmente aterrada por nosotros, porque, tal como me contó cincuenta y cinco años después, una noche nos dijo a Bea y a mí que teníamos que dormir en la cocina y puso cortinas, mantas y toallas bajo las puertas para que el aire no saliese. Pensaba encender el gas para que muriésemos

mientras dormíamos, pero al final no lo hizo. No sé si alguien puede echarle en cara que se le pasase por la cabeza. Desde luego, Bea y yo no.

Yo estaba muy asustado. Sé que suena ridículo, pero era el único varón, así que pasé a ser algo así como el hombre de la casa, aunque tuviese siete u ocho años. En La Haya, donde vivíamos, había muchas casas destartaladas en la costa, medio destruidas por los alemanes, que estaban construyendo búnkeres en nuestras playas. Yo iba por allí y robaba madera —iba a decir «recoger», pero era robar— de esas casas para tener combustible con el que cocinar y calentarnos.

Para tratar de no pasar frío en invierno, llevábamos ropa de lana basta, áspera, de baja calidad. Y hoy sigo sin tolerar la lana. Mi piel es tan sensible que duermo con sábanas de algodón del más fino. También es esa la razón por la que solo compro camisas de algodón de la mejor calidad, que no me irritan la piel. Mi hija Pauline dice que incluso me alejo si la veo llevando algo de lana. Ese es el efecto que la guerra aún ejerce sobre mí.

Mi padre volvió antes de que terminase la guerra, en el otoño de 1944. En mi familia no nos ponemos de acuerdo sobre cómo sucedió, pero, por lo que yo sé, mi maravillosa tía Lauk, la hermana de mi madre, estaba un día en Amsterdam, a unos cincuenta kilómetros de La Haya, y divisó a mi padre con una mujer. Lo siguió a distancia y lo vio entrar en una casa. Volvió más tarde y descubrió que estaba viviendo con una mujer.

Mi tía se lo contó a mi madre, que al principio se deprimió y se disgustó aún más, pero, según me contaron, se recompuso y cogió el barco a Amsterdam (los trenes ya no funcionaban), anduvo hasta la casa y llamó al timbre. Abrió la mujer y mi madre dijo: «Quiero hablar con mi marido». La mujer respondió: «Yo soy la mujer del señor Lewin». Pero mi madre insistió: «Quiero ver a mi marido». Mi padre salió a la puerta y ella dijo: «Te doy cinco minutos para que hagas la maleta y vuelvas conmigo o me divorciaré y no volverás a ver a tus hijos nunca más». A los tres minutos bajaba las escaleras con sus cosas y volvía con ella.

En varios aspectos fue mucho peor cuando volvió, porque la gente sabía que mi padre, cuyo nombre era también Walter Lewin, era judío. La Resistencia le había dado documentos falsos, con el nombre de Jaap Horstman, y a mi hermana y a mí nos ordenaron que le llamásemos tío Jaap. Es un verdadero milagro, que sigue sin

tener explicación para Bea y para mí, que nadie lo denunciara. Un carpintero construyó una trampilla en el suelo de nuestra casa. La podíamos levantar para que mi padre se escondiese en el semisótano. Sorprendentemente, mi padre consiguió evitar que lo apresasen.

Volvió a casa unos ocho meses antes de que acabase la guerra, el peor momento de la guerra para nosotros, la hambruna del invierno de 1944, el hongerwinter. Casi veinte mil personas murieron de hambre. Para calentarnos, nos arrastramos bajo la casa y arrancamos una de cada dos vigas —los grandes travesaños que sostenían la planta baja— para usarlas como leña. Durante ese invierno, comimos bulbos de tulipán e incluso corteza de árbol. La gente podía haber denunciado a mi padre a cambio de comida. Los alemanes pagaban dinero (creo que eran cincuenta florines, unos quince dólares de la época) por cada judío que se les entregaba.

Los alemanes vinieron a nuestra casa un día. Resultó que estaban requisando máquinas de escribir y vieron las nuestras, las que utilizábamos para dar clase, pero les parecieron demasiado viejas. Los alemanes, a su manera, eran bastante estúpidos: si te ordenan hacer acopio de máquinas de escribir, no detienes judíos. Parece de película, lo sé, pero sucedió de verdad.

Tras todo el trauma de la guerra, supongo que lo asombroso es que tuve una infancia más o menos normal. Mis padres siguieron con su colegio —el Haagsch Studiehuis— como habían hecho antes y durante la guerra, enseñando a escribir a máquina, taquigrafía, idiomas y habilidades para los negocios. Yo también impartí clases allí mientras estaba en la universidad.

Mis padres eran aficionados al arte y yo empecé a aprender también. La universidad fue una época maravillosa, tanto en lo social como en lo académico. Me casé en 1959, empecé el doctorado en enero de 1960 y mi primera hija, Pauline, nació un año más tarde. Mi hijo Emanuel (que ahora se llama Chuck) nació dos años después y nuestra segunda hija, Emma, llegó en 1965. Nuestro segundo hijo, Jakob, nació en Estados Unidos en 1967.

Cuando llegué al MIT, la fortuna me sonrió: me vi inmerso en la oleada de descubrimientos que se estaban produciendo en ese momento. Aunque no sabía nada de investigación espacial, la experiencia que yo podía ofrecer era perfecta para el equipo pionero en astronomía de rayos X de Bruno Rossi.

Los cohetes V-2 habían superado los límites de la atmósfera terrestre y se había abierto un nuevo horizonte de posibilidades de descubrimientos. Irónicamente, el V-2 lo había diseñado Werner von Braun, que era nazi. Desarrolló los cohetes durante la Segunda Guerra Mundial para matar a civiles aliados y fueron terriblemente destructivos. Los fabricaron trabajadores esclavos en Peenemünde y en la tristemente famosa planta subterránea de Mittelwerk, en Alemania, y unos veinte mil murieron en el proceso. Los cohetes causaron la muerte de más de siete mil civiles, en su mayoría en Londres. Había un lugar de lanzamiento a kilómetro y medio de la casa de mis abuelos maternos, cerca de La Haya. Recuerdo un ruido como de chisporroteo cuando cargaban los cohetes y un estruendo cuando los lanzaban. En un bombardeo, los Aliados intentaron destruir la maquinaria de los V-2, pero fallaron y en su lugar mataron a quinientos civiles holandeses. Después de la guerra, los norteamericanos llevaron a Von Braun a Estados Unidos y se convirtió en un héroe. Es algo que siempre me ha dejado atónito: ¡era un criminal de guerra!

Durante quince años, Von Braun trabajó con el ejército estadounidense en la construcción de los sucesores de los V-2, los misiles Redstone y Júpiter, que portaban cabezas nucleares. En 1960 entró en la NASA y dirigió el Marshall Space Flight Center, en Alabama, donde desarrolló los cohetes Saturno que llevaron astronautas a la Luna. Los sucesores de sus cohetes abrieron el campo de la astronomía de rayos X, así que, aunque sus cohetes empezaron siendo armamento, al menos también se utilizaron para el desarrollo de la ciencia. A finales de la década de 1950 y principios de la de 1960 abrieron nuevas ventanas al mundo —no, ¡al universo!—, dándonos la oportunidad de echar una ojeada más allá de la atmósfera terrestre y rastrear fenómenos que, de otra forma, no habríamos podido ver.

Para descubrir rayos X del espacio exterior, Rossi había seguido una corazonada. En 1959 acudió a un ex alumno suyo llamado Martin Annis, que entonces dirigía una empresa de investigación en Cambridge, American Science and Engineering (ASE), y le dijo: «Veamos si hay rayos X ahí fuera». El equipo de ASE, dirigido por el futuro premio Nobel Riccardo Giacconi, colocó tres contadores Geiger-Müller en un cohete que lanzaron el 18 de junio de 1962. Estuvo solo seis minutos por encima de los ochenta kilómetros de altitud fuera de la atmósfera terrestre (algo imprescindible,

pues la atmósfera absorbe los rayos X).

Por supuesto, detectaron rayos X y, lo que es incluso más importante, fueron capaces de demostrar que provenían de una fuente situada fuera del sistema solar. Fue una bomba que cambió la astronomía por completo. Nadie lo esperaba y a nadie se le ocurrían razones plausibles para que estuviesen ahí; nadie entendió realmente el hallazgo. Rossi se había lanzado a explorar una idea arriesgada para ver si tenía algún sentido. Este es el tipo de corazonadas que tiene un gran científico.

Recuerdo la fecha exacta en que llegué al MIT, el 11 de enero de 1966, porque uno de nuestros hijos contrajo las paperas y tuvimos que retrasar el viaje a Boston; KLM no nos dejaba volar, ya que las paperas son contagiosas. En mi primer día conocí a Bruno Rossi y también a George Clark, que en 1964 había sido el primero en lanzar un globo a mucha altitud —unos 43.000 metros— para buscar fuentes que emitiesen rayos X de muy alta energía, de modo que pudiesen penetrar la atmósfera hasta esa altitud. George me dijo: «Sería estupendo que quisieras unirte a mi grupo». Estaba exactamente en el sitio adecuado en el momento adecuado.

Si eres el primero en hacer algo estás abocado a tener éxito, y nuestro equipo hizo un descubrimiento tras otro. George era muy generoso: tras dos años me traspasó el control del grupo por completo. Estar en la punta de lanza de la nueva vanguardia de la astrofísica fue simplemente extraordinario.

Tuve la increíble suerte de encontrarme metido de lleno en el trabajo más emocionante que se estaba haciendo entonces en astrofísica, pero lo cierto es que todas las áreas de la física son asombrosas; todas están plagadas de delicias misteriosas y revelan asombrosos descubrimientos continuamente. Mientras nosotros encontrábamos nuevas fuentes de rayos X, los físicos de partículas descubrían elementos cada vez más fundamentales de la estructura del núcleo, resolviendo el misterio de qué es lo que lo mantiene unido, descubriendo los bosones W y Z, que transmiten las interacciones nucleares «débiles», y los quarks y los gluones, que transmiten las interacciones «fuertes».

La física nos ha permitido remontarnos muy atrás en el tiempo, hasta los límites del universo, y recrear la asombrosa imagen conocida como campo ultraprofundo del Hubble (HUDF: Hubble Ultra Deep Field), que revela lo que parece ser una infinidad

de galaxias. No deberías terminar este capítulo sin buscar en internet el Campo ultraprofundo. ¡Tengo amigos que se han puesto esta imagen como salvapantallas!

El universo tiene unos 13.700 millones de años. Sin embargo, debido a que el espacio se ha expandido muchísimo desde el big bang, actualmente estamos viendo galaxias que se formaron entre 400 y 800 millones de años después del big bang y que ahora están a mucho más de 13.700 millones de años luz. Los astrónomos calculan ahora que el límite del universo observable se encuentra a unos 47.000 millones de años luz de nosotros en cada dirección. Debido a la expansión del espacio, muchas galaxias remotas se están alejando de nosotros a una velocidad superior a la de la luz. Esto puede parecer sorprendente, incluso imposible, a quienes fueron educados en la idea de que, como Einstein postuló en su teoría especial de la relatividad, nada puede ir más rápido que la velocidad de la luz. Sin embargo, de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, no hay límites para la velocidad entre dos galaxias cuando el propio espacio se está expandiendo. Existen razones de peso por las que los científicos piensan ahora que estamos viviendo la era dorada de la cosmología, el estudio del origen y la evolución de todo el universo.

La física ha explicado la belleza y la fragilidad de los arcos iris, la existencia de agujeros negros, por qué los planetas se mueven como lo hacen, qué sucede cuando una estrella explota, por qué una patinadora sobre hielo se acelera cuando junta los brazos al cuerpo, por qué los astronautas no pesan en el espacio, cómo se formaron los elementos del universo, cuándo empezó el universo, cómo produce música una flauta, cómo generamos la electricidad que mueve nuestros cuerpos y nuestra economía y cómo sonó el big bang. Ha explorado las dimensiones más diminutas del espacio subatómico y las mayores distancias del universo.

Mi amigo y colega Victor Weisskopf, que ya era toda una institución cuando llegué al MIT, escribió un libro titulado The Privilege of Being a Physicist. Este maravilloso título expresa los sentimientos que sentí al encontrarme involucrado de lleno en uno de los períodos más emocionantes de descubrimientos en astronomía y astrofísica desde que los hombres y las mujeres empezaron a mirar detenidamente al cielo por la noche. La gente con la que he trabajado en el MIT, a veces justo al otro lado del pasillo, han ideado técnicas asombrosamente creativas y sofisticadas para hacer

frente a las preguntas más fundamentales de toda la ciencia. Y ha sido un privilegio para mí tanto ayudar a ampliar el conocimiento colectivo de la humanidad sobre las estrellas y el universo como iniciar a varias generaciones de jóvenes en la comprensión y el amor por este magnífico campo del saber.

Desde esos primeros días en que sostuve isótopos radiactivos en la palma de la mano, los descubrimientos de la física, tanto antiguos como nuevos, nunca han dejado de fascinarme, como tampoco lo han dejado de hacer su rica historia y sus fronteras en continuo movimiento y la manera en que ha abierto mis ojos a las inesperadas maravillas del mundo que me rodea. Para mí, la física es una forma de ver —lo espectacular y lo corriente, lo inmenso y lo diminuto— como un todo entretejido de una manera hermosa y emocionante.

Así es como he intentado siempre que la física cobrase vida para mis estudiantes. Creo que es mucho más importante que recuerden la belleza de los descubrimientos que centrarse en las complicadas matemáticas; a fin de cuentas, la mayoría no acabará dedicándose a la física. He hecho todo lo que he podido para ayudarles a ver el mundo de otra manera, para que se hicieran preguntas que nadie antes les había enseñado a plantearse, para que pudieran ver los arcos iris como nunca los habían visto antes y para que se centrasen en la exquisita belleza de la física en lugar de en los detalles de las matemáticas. Esta es también la intención de este libro, ayudarte a abrir los ojos ante las extraordinarias formas que tiene la física de iluminar los entresijos de nuestro mundo y su prodigiosa belleza y elegancia.

Capítulo 2

Mediciones, imprecisiones y estrellas

Mi abuela y Galileo Galilei

La física es básicamente una ciencia experimental y las mediciones y sus imprecisiones constituyen el fundamento de todo experimento, todo descubrimiento. Incluso los grandes avances teóricos en física llegan en forma de predicciones sobre cantidades que pueden medirse. Por ejemplo, la segunda ley de Newton, F = ma (fuerza es igual a masa por aceleración), quizá la ecuación más importante de la física, o la fórmula $E = mc^2$ de Einstein (energía es igual a masa por velocidad de la luz al cuadrado), la ecuación más conocida de la física. Si no es mediante ecuaciones matemáticas, ¿de qué otra manera pueden los físicos expresar relaciones entre magnitudes medibles como la densidad, el peso, la longitud, la carga, la atracción gravitatoria, la temperatura o la velocidad?

Reconozco que puede que no sea imparcial, ya que la investigación de mi doctorado consistió en medir distintos tipos de desintegración nuclear con un alto grado de precisión y que mis contribuciones a los primeros años de la astronomía de rayos X se produjeron en forma de mediciones de rayos X de alta energía provenientes de lugares a decenas de miles de años luz. Pero la física sin mediciones sencillamente no existe. Y tan importante como eso es que las medidas no tienen sentido sin sus imprecisiones.

Sin darse cuenta, uno espera continuamente que la imprecisión tenga valores razonables. Cuando tu banco te informa de cuánto dinero tienes en tu cuenta, esperas una imprecisión de menos de medio céntimo. Cuando compras ropa por internet, esperas que el tallaje no varíe más que una pequeña fracción de una talla. Un par de pantalones de la talla 44 que varíe en solo un 3 por ciento cambia una talla entera de cintura y puede acabar siendo una 45, y colgarte de las caderas, o una 43, y hacer que te preguntes cómo has engordado tanto.

También es fundamental que las mediciones se expresen en las unidades correctas. Valga como ejemplo la Mars Climate Orbiter, una misión de once años de duración con un coste de 125 millones de dólares que acabó en fracaso por una confusión con las unidades. Un equipo de ingenieros utilizó unidades del sistema métrico

decimal mientras que otro utilizó unidades del sistema anglosajón y, como resultado, en septiembre de 1999, la nave espacial entró en la atmósfera de Marte en lugar de alcanzar una órbita estable.

En la mayor parte de este libro utilizo unidades del sistema métrico decimal porque son las que usan la mayoría de los científicos. Sin embargo, de vez en cuando utilizo unidades del sistema anglosajón cuando lo considero apropiado. Para la temperatura utilizo las escalas Celsius o Kelvin (Celsius más 273,15), pero a veces uso Fahrenheit, pese a que ningún físico trabaja en grados Fahrenheit.

Mi aprecio por el papel crucial de las mediciones en la física es una de las razones por las que soy escéptico respecto a las teorías que no pueden verificarse mediante mediciones. Por ejemplo, la teoría de cuerdas, o su prima mayor, la teoría de supercuerdas, el último intento de los teóricos por desarrollar una «teoría del todo». Los físicos teóricos, y hay algunos muy brillantes dedicados a la teoría de cuerdas, aún tienen que idear algún experimento, alguna predicción, que pueda demostrar alguna de las proposiciones de la teoría de cuerdas. No hay nada en la teoría de cuerdas que pueda verificarse experimentalmente, al menos hasta ahora. Esto significa que la teoría de cuerdas no tiene capacidad de predicción, lo que hace que algunos físicos, como Sheldon Glashow en Harvard, duden que se pueda incluso considerar física.

Sin embargo, la teoría de cuerdas cuenta con algunos defensores brillantes y elocuentes. Brian Greene es uno de ellos, y su libro y su programa de la PBS El universo elegante (en el que aparece una breve entrevista conmigo) son entretenidos y estupendos. La teoría M de Edward Witten, que unificó cinco teorías de cuerdas diferentes y postula que existen once dimensiones del espacio, de las que nosotros, seres inferiores, solo vemos tres, es algo bastante tremendo e intrigante.

Pero, cuando la teoría se desboca, pienso en mi abuela materna, una gran dama de maravillosos dichos y costumbres que dejaban claro que tenía una gran intuición científica. Solía decirme, por ejemplo, que eres más bajo cuando estás de pie que cuando estás tumbado, algo que me encanta enseñarles a mis alumnos. El primer día de clase les anuncio que, en honor a mi abuela, voy a comprobar esta idea descabellada. Por supuesto, esto les desconcierta por completo. Casi puedo ver

cómo piensan: «¿Más bajo de pie que tumbado? ¡Imposible!».

Su incredulidad es comprensible. Desde luego, si hay alguna diferencia de altura entre estar tumbado y de pie debe de ser bastante pequeña. Al fin y al cabo, si fuese de 30 centímetros lo notarías, ¿no? Te levantarías de la cama por la mañana, te pondrías de pie y harías «cloc»: 30 centímetros menos. Pero si la diferencia fuese de solo 0,1 centímetros nunca te darías cuenta. Por eso sospecho que, si mi abuela tenía razón, la diferencia es probablemente de solo unos pocos centímetros, 2 o 3.

Para llevar a cabo mi experimento, primero debo lograr que den por bueno el grado de imprecisión en mis mediciones. Así que empiezo midiendo una barra de aluminio verticalmente —salen 150,0 centímetros— y les pido que acepten que probablemente soy capaz de medirla con una precisión de más/menos una décima de centímetro. Así que la medida vertical es 150,0 ± 0,1 centímetros. Después mido la barra en horizontal y obtengo 149,9 ± 0,1 centímetros, lo que concuerda —dentro de la imprecisión de las mediciones— con la medida vertical.

¿Qué consigo al medir la barra de aluminio en ambas posiciones? ¡Mucho! Por un lado, las dos mediciones demuestran que he sido capaz de medir la longitud con una precisión de 0,1 centímetros (1 milímetro). Pero para mí es al menos igual de importante demostrarles a los alumnos que no estoy jugando con ellos. Supongamos, por ejemplo, que he preparado una vara de medir «trucada» para mis mediciones horizontales, que sería algo terrible y muy deshonesto. Al mostrar que la longitud de la barra de aluminio es la misma en las dos mediciones, demuestro que mi integridad científica está fuera de toda duda.

Entonces pido un voluntario, lo mido de pie, escribo el número en la pizarra: 185,2 centímetros (± 0,1 centímetros, por supuesto), para tener en cuenta la imprecisión. A continuación, le pido que se tumbe sobre mi mesa en mi equipo de medición, que parece un Ritz Stick gigante, el aparato de madera que tienen en las zapaterías para medir el tamaño del pie, pero en el que su cuerpo entero es el que hace de pie. Bromeo un poco sobre si está cómodo y le agradezco su sacrificio por la ciencia, lo que hace que se sienta un pelín incómodo. ¿Qué guardo en la manga? Deslizo el taco de madera triangular hasta ajustarlo contra su cabeza y, mientras sigue ahí tumbado, escribo el nuevo número en la pizarra. Así que ahora tenemos dos mediciones, cada una con su imprecisión de 0,1 centímetros. ¿Cuál es el resultado?

¿Te sorprende saber que los resultados difieren en 2,5 centímetros (± 0,2 centímetros, por supuesto)? Debo concluir que realmente es 2,3 centímetros más alto cuando está tumbado. Vuelvo a mi alumno postrado, anuncio que es aproximadamente 2,5 centímetros más alto durmiendo que de pie y, esta es la mejor parte, declaro: «¡Mi abuela tenía razón! ¡Como siempre!».

¿No te lo crees? Pues resulta que mi abuela era mejor científica que la mayoría de nosotros. Cuando estamos de pie, el empuje de la gravedad comprime el tejido blando entre las vértebras de la columna vertebral, mientras que, cuando nos tumbamos, la columna se extiende. Una vez que lo sabes puede parecer obvio, pero ¿lo habrías predicho? De hecho, ni siquiera los científicos de la NASA previeron este efecto al planificar las primeras misiones espaciales. Los astronautas se quejaron de que sus trajes les apretaban más cuando estaban en el espacio. Estudios posteriores, durante la misión Skylab, demostraron que los seis astronautas de los que tomaron medidas habían crecido alrededor del 3 por ciento (algo más de cinco centímetros si mides un metro ochenta). Ahora los trajes de los astronautas se fabrican con un margen adicional para tener en cuenta este crecimiento.

¿Ves lo reveladoras que pueden llegar a ser unas buenas mediciones? En la misma clase en que demuestro que mi abuela tenía razón, me divierto midiendo algunas cosas muy raras, todo para probar una sugerencia del gran Galileo Galilei, el padre de la ciencia y la astronomía modernas, que una vez se preguntó: «¿Por qué tienen los mayores mamíferos el tamaño que tienen y no son más grandes?». Se respondió a sí mismo suponiendo que si un mamífero llegaba a pesar demasiado sus huesos se romperían. Cuando leí esto sentí curiosidad por saber si tenía razón o no. Su respuesta parecía intuitivamente correcta, pero quise comprobarlo.

Sé que los fémures de los mamíferos —los huesos de sus muslos— soportan la mayoría de su peso, así que decidí hacer varias mediciones comparando los fémures de distintos mamíferos. Si Galileo tenía razón, entonces el fémur de un animal extremadamente pesado no sería lo suficientemente resistente como para soportar su peso. Evidentemente, yo sabía que la resistencia del fémur del animal tenía que depender de su grosor. Es algo intuitivo que los huesos más gruesos soportan más peso. Cuanto más grande fuese el animal, más resistentes debían ser sus huesos.

Por supuesto, el fémur también sería más largo cuanto más grande fuese el animal

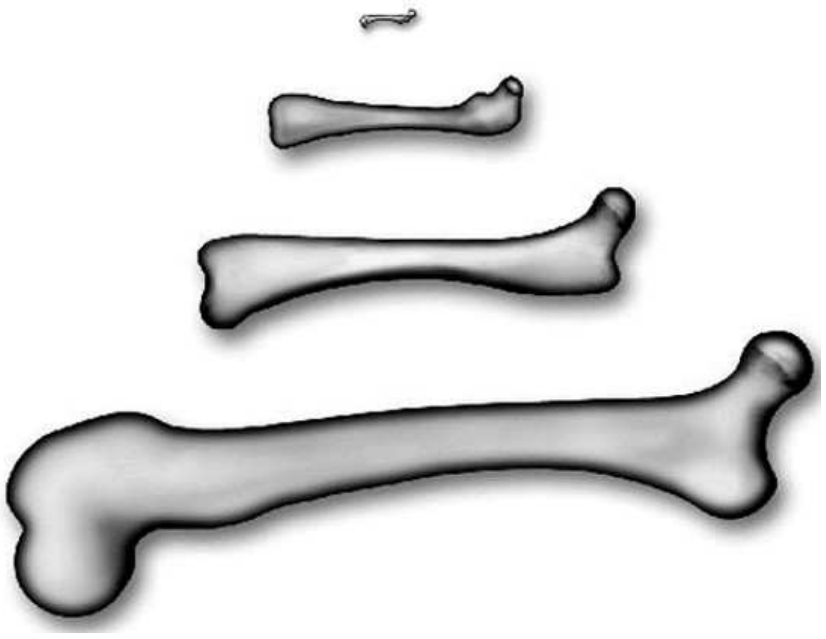
y caí en que, comparando las longitudes y los grosores de los fémures frente al tamaño de los animales, podía poner a prueba la idea de Galileo. Según mis cálculos, que son demasiado complicados para explicarlos aquí (lo hago en el Apéndice 1), decidí que, si Galileo tenía razón, a medida que los mamíferos iban siendo más grandes el grosor de sus fémures tenía que aumentar más rápido que su longitud. Por ejemplo, calculé que si un animal era cinco veces más grande que otro —y su fémur, por tanto, cinco veces más largo—, el grosor de su fémur tendría que ser once veces mayor.

Esto implicaría que llegaría un momento en que coincidirían el grosor y la longitud de los fémures, o incluso sería mayor el primero que la segunda, lo que daría como resultado unos mamíferos bastante poco viables. Desde luego, un animal así no sería el mejor adaptado en la lucha por la supervivencia, por eso existe un límite máximo al tamaño de los mamíferos.

Ya había hecho mi predicción de que el grosor aumentaría más rápido que la longitud. Ahora venía lo divertido.

Fui a la Universidad de Harvard, donde tienen una hermosa colección de huesos, y les pedí unos fémures de mapache y de caballo. Un caballo es unas cuatro veces más grande que un mapache y, como cabía esperar, el fémur de caballo (42,0 ± 0,5 centímetros) era unas tres veces y media más largo que el de mapache (12,4 ± 0,3 centímetros). Hasta aquí todo bien. Metí los números en mi fórmula y predije que el fémur de caballo debía de ser algo más de seis veces más grueso que el de mapache. Cuando medí los grosores (con una imprecisión de alrededor de medio centímetro para el mapache y de dos centímetros para el caballo), resultó que el hueso del caballo era cinco veces más grueso, más/menos alrededor de un 10 por ciento. La cosa pintaba muy bien para Galileo. Sin embargo, decidí ampliar la muestra e incluir mamíferos tanto más pequeños como más grandes.

Así que volví a Harvard y me dieron otros tres huesos, de antílope, zarigüeya y ratón. He aquí una comparación de los huesos:



¿No es maravilloso, tan romántico? La progresión descendente de las formas es preciosa, fíjate en lo delicado y minúsculo que es el fémur de ratón. Un fémur diminuto para un ratón diminuto. ¿No es hermoso? Nunca dejará de maravillarme la belleza de cada detalle del mundo natural.

Pero ¿y las mediciones? ¿Cómo encajan en mi ecuación? Cuando hice los cálculos me quedé estupefacto, verdaderamente estupefacto. El fémur de caballo es unas 40 veces más largo que el de ratón y mis cálculos predecían que debía ser más de 250 veces más grueso. Sin embargo, solo era unas 70 veces más grueso.

Así que me dije: *«¿Por qué no he pedido un fémur de elefante? Eso podría zanjar la cuestión definitivamente»*. Creo que en Harvard ya estaban un poco hartos de mí cuando volví a aparecer por allí, pero me dieron amablemente un fémur de elefante. ¡Para entonces seguro que lo único que querían era librarse de mí! Créeme, me costó transportar ese hueso: medía más de un metro y pesaba una tonelada. Tenía tantas ganas de hacer mis mediciones que esa noche no conseguí pegar ojo.

¿Sabes cuál fue el resultado? El fémur de ratón tenía una longitud de 1,1 ± 0,05 centímetros y un grosor muy fino, de 0,7 ± 0,1 milímetros. El fémur de elefante medía 101 ± 1 centímetros de largo, unas cien veces más que el de ratón. ¿Y su grosor? Medí 86 ± 4 milímetros, aproximadamente 120 veces el diámetro del fémur de ratón. Pero, según mis cálculos, si Galileo tenía razón el fémur de elefante debía

ser aproximadamente mil veces más grueso que el de ratón. En otras palabras, debía tener un grosor de unos 70 centímetros. Sin embargo, el grosor real era solo de unos 9 centímetros. Tuve que admitir, a regañadientes, que ¡el gran Galileo se había equivocado!

Medir el espacio interestelar

Una de las áreas de la física en las que la medición ha sido más problemática es la astronomía. Para los astrónomos, las mediciones y sus imprecisiones suponen problemas enormes, sobre todo por las inmensas distancias con las que tratamos. ¿A qué distancia están las estrellas? ¿Y nuestra hermosa vecina, la galaxia de Andrómeda? ¿Y qué hay de los telescopios más potentes? Cuando vemos los objetos más distantes del universo, ¿a qué distancia estamos mirando? ¿Cuál es el tamaño del universo?

Estas son algunas de las preguntas más profundas y fundamentales de toda la ciencia. Y las diferentes respuestas han ido cambiando por completo nuestra forma de ver el universo. De hecho, tras el asunto de la distancia se oculta una historia maravillosa. Puedes trazar la evolución de la propia astronomía a través de las distintas técnicas para calcular las distancias estelares. En cada momento, estas dependen del grado de precisión de las mediciones, lo que equivale a decir que dependen tanto del material que utilizan los astrónomos como de su ingenio. Hasta finales del siglo XIX, la única forma en que los astrónomos podían hacer estos cálculos era midiendo algo llamado paralaje.

Aunque no lo sepáis, todos conocéis el fenómeno del paralaje. Desde donde estéis sentados, mirad a vuestro alrededor y buscad un pedazo de pared que tenga algo en ella —una puerta o un cuadro colgado— o, si estáis en la calle, fijaos en algún elemento del paisaje, como un árbol grande. Estirad la mano delante de vosotros y poned un dedo a un lado u otro del elemento en cuestión. Cerrad primero el ojo derecho y después el izquierdo. Veréis como el dedo pasa de estar a la izquierda de la puerta o el árbol a estar a su derecha. Acercaos el dedo a los ojos y hacedlo de nuevo. El dedo se mueve aún más. ¡El efecto es enorme! Eso es el paralaje.

Sucede debido al paso de una línea a otra de visión al observar un objeto, en este caso entre la de vuestro ojo izquierdo y el derecho (vuestros ojos distan entre sí

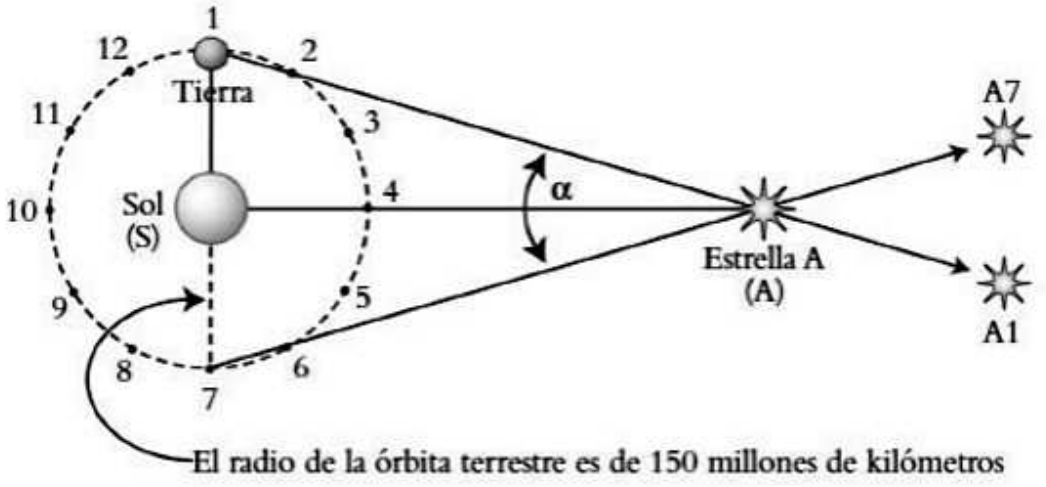
unos 6,5 centímetros).

Esa es la idea básica para determinar las distancias a las estrellas. Solo que en lugar de tomar como referencia los 6,5 centímetros de separación aproximada entre mis ojos, ahora utilizamos el diámetro de la órbita terrestre (unos 300 millones de kilómetros). A medida que la Tierra se mueve alrededor del Sol durante un año (en una órbita con un diámetro de unos 300 millones de kilómetros) una estrella cercana se moverá en el cielo en relación con otras estrellas más distantes. Medimos el ángulo en el cielo (llamado ángulo de paralaje) entre las dos posiciones de la estrella con seis meses de diferencia. Si se toman muchas series de medidas con seis meses de diferencia entre sí, se obtienen distintos ángulos de paralaje. En la figura siguiente, para simplificar, he elegido una estrella en el mismo plano que la órbita de la Tierra (llamado plano orbital, también conocido como plano de la eclíptica). Sin embargo, el principio de las mediciones de paralaje descrito aquí es válido para cualquier estrella, no solo para las que se encuentren en el plano de la eclíptica.

Supón que observas la estrella cuando la Tierra está situada en la posición 1 en su órbita alrededor del Sol. Verás entonces la estrella proyectada sobre el fondo (muy lejos) en la dirección A1. Si observas la misma estrella seis meses después (desde la posición 7), la verás en la dirección A7. El ángulo marcado como α es el mayor ángulo de paralaje posible. Si tomas mediciones similares desde las posiciones 2 y 8, 3 y 9 y 4 y 10, siempre obtendrás ángulos de paralajes menores que α. En el caso hipotético de que hicieses observaciones desde los puntos 4 y 10 (hipotético porque la estrella no se puede observar desde la posición 10, ya que el Sol está en medio), el ángulo de paralaje llegaría incluso a ser cero. Mira ahora el triángulo formado por los puntos 1A7. Sabemos que la distancia 1-7 es de 300 millones de kilómetros y conocemos el ángulo α. Por tanto, podemos calcular la distancia SA (con matemáticas de secundaria; véase infra).

Aunque los ángulos de paralaje tomados en distintos intervalos de seis meses varían, los astrónomos hablan del paralaje de una estrella, en singular. Se refieren a la mitad del mayor ángulo de paralaje. Si el ángulo de paralaje máximo fuese 2,00 segundos de arco, el paralaje sería 1,00 segundos de arco y la distancia a la estrella sería entonces de 3,26 años luz (aunque no existe ninguna estrella tan

cercana a nosotros). Cuanto menor es el paralaje, mayor es la distancia. Si el paralaje es de 0,10 segundos de arco, la distancia es de 32,6 años luz. La estrella más cercana al Sol es Próxima Centauri. Su paralaje es de 0,76 segundos de arco; por tanto, su distancia es de unos 4,3 años luz.



Para entender lo pequeños que son los cambios en la posición de las estrellas que los astrónomos deben medir, tenemos que entender lo pequeño que es un segundo de arco. Imagínate un círculo enorme dibujado en el cielo nocturno que pase por el cénit (justo sobre nuestras cabezas) y dé una vuelta completa alrededor de la Tierra. Ese círculo tiene por supuesto 360 grados. Cada grado se divide en sesenta minutos de arco y cada minuto de arco se divide a su vez en sesenta segundos de arco. Así que hay 1.296.000 segundos de arco en ese círculo completo. Como puedes ver, un segundo de arco es algo muy pequeño.

He aquí otra forma de ver lo pequeño que es: si coges una moneda de diez centavos y la colocas a 3,5 kilómetros de distancia, su diámetro ocuparía un segundo de arco. Y otro ejemplo más: cualquier astrónomo sabe que la Luna mide medio grado, o treinta minutos de arco, es lo que se llama el tamaño angular de la Luna; si pudieses cortar la Luna en 1.800 rodajas iguales, cada una mediría un segundo de arco.

Como los ángulos de paralaje que los astrónomos han de medir para determinar las distancias son tan pequeños, puedes hacerte una idea de lo importante que es para

ellos el grado de precisión en las mediciones.

A medida que las mejoras en los equipos han ido permitiendo a los astrónomos hacer mediciones cada vez más precisas, sus estimaciones de las distancias estelares han ido cambiando, a veces de forma notable. A principios del siglo XIX, Thomas Henderson midió para la estrella más brillante del firmamento, Sirio, un ángulo de paralaje de 0,23 segundos de arco, con una imprecisión de alrededor de un cuarto de segundo de arco. En otras palabras, había medido que el límite superior del paralaje era de alrededor de medio segundo de arco, lo que significaba que la estrella no podía estar a menos de 6,5 años luz de nosotros. En 1839, este fue un resultado muy importante. Pero medio siglo después, David Gill obtuvo para el paralaje de Sirio un valor de 0,370 segundos de arco con una imprecisión de ± 0,010 segundos de arco. Las mediciones de Gill eran consistentes con las de Henderson, pero eran mucho mejores porque la imprecisión era veinticinco veces menor. Con un paralaje de 0,370 ± 0,010 segundos de arco, la distancia a Sirio pasaba a ser 8,81 ± 0,23 años luz, ¡que es bastante mayor que 6,5 años luz!

En los años noventa, Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite), el satélite de recogida de paralajes de alta precisión (creo que jugaron con el nombre hasta que encajara con el de un famoso astrónomo griego de la Antigüedad), midió los paralajes (y, por tanto, las distancias) de más de cien mil estrellas con una imprecisión de alrededor de una milésima de segundo de arco. ¿No es increíble? ¿Recuerdas la distancia a la que tenía que estar la moneda para cubrir un segundo de arco? Para cubrir una milésima de segundo de arco, tendría que estar a 3.500 kilómetros del observador.

Una de las estrellas cuyo paralaje midió Hipparcos fue, por supuesto, Sirio, y el resultado fue 0,37921 ± 0,00158 segundos de arco, lo que da una distancia de 8,601 ± 0,036 años luz.

Con diferencia, las mediciones más precisas del paralaje que se han tomado nunca las obtuvieron los radioastrónomos, que, entre 1995 y 1998, lo midieron para una estrella muy especial llamada Sco X-1. Te contaré la historia completa en el capítulo 10. Obtuvieron un paralaje de 0,00036 ± 0,00004 segundos de arco, lo que se traduce en una distancia de 9,1 ± 0,9 miles de años luz.

Además de las imprecisiones con las que hay que trabajar en astronomía como

consecuencia de la precisión limitada de nuestros equipos y de los límites en el tiempo de observación disponible, están las pesadillas de los astrónomos: las imprecisiones «desconocidas-ocultas». Puede que estés cometiendo un error del que ni siquiera eres consciente porque se te olvida algo o porque tus instrumentos no están bien calibrados. Imagínate que la báscula de tu baño marca cinco kilos de menos y que ha sido así desde que la compraste. Solo descubrirías el error cuando fueses al médico y estuvieses al borde de un infarto. Esto es lo que llamamos un error sistemático y es algo que nos da mucho miedo. No le tengo mucho aprecio al antiguo secretario de Defensa Donald Rumsfeld, pero sí sentí algo de simpatía por él cuando dijo, en una rueda de prensa en 2002: «Sabemos que hay cosas que no sabemos. Pero también existen cosas desconocidas que no sabemos, aquellas que no sabemos que no sabemos».

Las dificultades que imponen las limitaciones de nuestros equipos hacen que el logro de una astrónoma brillante pero bastante desconocida, Henrietta Swan Leavitt, sea aún más asombroso. Leavitt ocupaba un puesto de poca relevancia en el observatorio de Harvard en 1908 cuando empezó este trabajo, que hizo posible un salto de gigante en la medición de la distancia a las estrellas.

Este tipo de cosas han sucedido tan a menudo en la historia de la ciencia que debería considerarse un error sistemático: ignorar el talento, la inteligencia y las aportaciones de las mujeres científicas[4].

Mientras analizaba miles de placas fotográficas de la Pequeña Nube de Magallanes (SMC: Small Magellanic Cloud), Leavitt se dio cuenta de que, para cierta clase de estrellas grandes y pulsantes (conocidas ahora como variables Cefeidas), existía una relación entre el brillo óptico de la estrella y la duración de un pulso completo, llamado período de la estrella. Vio que cuanto más largo era el período, más brillante era la estrella. Como veremos, este descubrimiento abrió las puertas para medir con precisión las distancias a cúmulos de estrellas y galaxias.

Para valorar el descubrimiento, primero tenemos que entender la diferencia entre brillo y luminosidad. El brillo óptico es la cantidad de energía por metro cuadrado y

[4] Le sucedió a Lise Meitner, que contribuyó al descubrimiento de la fisión nuclear; a Rosalind Franklin, que ayudó a descubrir la estructura del ADN, y a Jocelyn Bell, que descubrió los púlsares y que debería haber compartido el premio Nobel que en 1974 obtuvo su tutor, Antony Hewish, por «su papel decisivo en el descubrimiento de los púlsares»

por segundo de luz que recibimos en la Tierra. Se mide utilizando telescopios ópticos. La luminosidad óptica, por su parte, es la cantidad de energía que irradia por segundo un objeto astronómico.

Tomemos por ejemplo Venus, a menudo el objeto más brillante en todo el cielo nocturno, más incluso que Sirio, la estrella más brillante del firmamento. Venus está muy cerca de la Tierra. Por tanto, es muy brillante, aunque apenas posee luminosidad intrínseca. Irradia relativamente poca energía en comparación con Sirio, un potente horno nuclear cuya masa es el doble que la de nuestro Sol y que es veinticinco veces más luminoso. Conocer la luminosidad de un objeto permite a los astrónomos saber mucho sobre él, pero lo complicado de la luminosidad es que no existía una buena forma de medirla. Mides el brillo porque es lo que puedes ver; no puedes medir la luminosidad. Para medirla tienes que conocer tanto el brillo de la estrella como la distancia a la que se encuentra.

Utilizando una técnica llamada paralaje estadístico, Ejnar Hertzsprung, en 1913, y Harlow Shapley, en 1918, consiguieron convertir los valores de brillo obtenidos por Leavitt en luminosidades. Y, suponiendo que la luminosidad de una Cefeida con un determinado período en la SMC era la misma que la de una Cefeida con el mismo período fuera de la SMC, obtuvieron una forma de calcular la relación de luminosidad de todas las Cefeidas (incluso las que no estaban en la SMC). No me extenderé aquí acerca de este método, porque es algo bastante técnico; lo que hay que valorar es que el trabajo sobre la relación entre luminosidad y período resultó fundamental en la medición de distancias. Una vez que conoces la luminosidad y el brillo de una estrella, puedes calcular su distancia.

El rango de luminosidades, por cierto, es considerable. La luminosidad de una Cefeida con un período de tres días es unas mil veces mayor que la del Sol. Si su período es de treinta días, su luminosidad es unas trece mil veces mayor que la del Sol.

En 1923, el gran astrónomo Edwin Hubble encontró Cefeidas en la galaxia de Andrómeda (también conocida como M31), de lo que dedujo que su distancia era alrededor de 1 millón de años luz, un resultado realmente sorprendente para muchos astrónomos. Muchos, incluido Shapley, habían afirmado que nuestra Vía Láctea contenía el universo entero, incluida la M31, y Hubble demostró que en

realidad estaba a una distancia de nosotros casi inconcebible. Pero si buscas en Google la distancia a la galaxia de Andrómeda, verás que es de 2,5 millones de años luz.

Este fue un ejemplo de cosas desconocidas que no sabemos. A pesar de su genialidad, Hubble había cometido un error sistemático. Había basado sus cálculos en la luminosidad conocida de lo que acabarían denominándose Cefeidas de tipo II, cuando en realidad estaba observando un tipo de variable Cefeida unas cuatro veces más luminosa que la que creía estar viendo (que terminarían conociéndose como Cefeidas de tipo I). Los astrónomos no descubrieron la diferencia hasta los años cincuenta y de pronto se dieron cuenta de que las mediciones de distancias que habían hecho en los treinta años anteriores eran incorrectas en un factor dos, un gran error sistemático que dobló el tamaño del universo conocido.

En 2004, utilizando aún el método de las variables Cefeidas, los astrónomos obtuvieron para la distancia a la galaxia de Andrómeda un valor de 2,51 ± 0,13 millones de años luz. En 2005, otro grupo la midió utilizando el método de las estrellas binarias eclipsantes, obteniendo como resultado 2,52 ± 0,14 millones de años luz, alrededor de 24 trillones de kilómetros. Estos dos resultados concuerdan de forma excelente. Aun así, la imprecisión es de unos 140.000 años luz (1,3 × 1018 kilómetros). Y esta galaxia es, a escala astronómica, nuestra vecina de al lado. Imagínate la imprecisión que tenemos para las distancias de muchas otras galaxias.

Puedes entender por qué los astrónomos siempre andan buscando lo que llaman candelas estándar, objetos con luminosidades conocidas: permiten estimar las distancias utilizando una variedad de formas ingeniosas de fabricar cintas métricas fiables para el cosmos. Y han resultado fundamentales para establecer lo que llamamos la escala de distancias cósmicas.

Usamos el paralaje para medir distancias en el primer peldaño de la escala. Gracias a las mediciones de paralaje extraordinariamente precisas de Hipparcos, podemos medir con este método las distancias de objetos hasta varios miles de años luz. El siguiente paso son las Cefeidas, que nos permiten obtener buenas estimaciones para distancias de objetos hasta cien millones de años luz. Para el siguiente escalón, los astrónomos utilizan una variedad de métodos exóticos y complicados

demasiado técnicos para verlos aquí, muchos de los cuales se basan en candelas estándar.

Las mediciones de distancia se vuelven más complicadas cuanto más alejado está lo que queremos medir. Esto se debe en parte al extraordinario descubrimiento que realizó Edwin Hubble en 1925 de que todas las galaxias del universo se están alejando las unas de las otras. El descubrimiento de Hubble, uno de los más sorprendentes e importantes de toda la astronomía, quizá de toda la ciencia del siglo pasado, solo puede compararse con el descubrimiento por parte de Darwin de la evolución mediante la selección natural.

Hubble vio que la luz que emitían las galaxias mostraba un desplazamiento característico hacia el extremo menos energético del espectro, la zona «roja», donde las longitudes de onda son mayores. Es lo que se llama desplazamiento hacia el rojo. Cuanto mayor sea el desplazamiento hacia el rojo, más rápido se está alejando la galaxia. En la Tierra, para el sonido, este efecto se conoce como efecto Doppler y explica por qué podemos saber si una ambulancia se acerca o se aleja de nosotros, ya que las notas son más graves cuando se aleja y más agudas cuando se acerca. (Comentaré el desplazamiento por efecto Doppler con más detalle en el capítulo 13.)

Para todas las galaxias para las que pudo medir su desplazamiento hacia el rojo y su distancia, Hubble comprobó que, cuanto más lejos estaban estos objetos, más rápido se alejaban. Por tanto, el universo se estaba expandiendo. ¡Un descubrimiento monumental! Cada galaxia en el universo se alejaba cada vez más rápido de todas las demás.

Esto puede provocar mucha confusión sobre qué significa la palabra distancia cuando las galaxias están a miles de millones de años luz. ¿Nos referimos a la distancia cuando la luz se emitió (hace 13.000 millones de años, por ejemplo) o a la distancia a la que creemos que el objeto está ahora, ya que esta ha aumentado sustancialmente en esos 13.000 millones de años? Puede que un astrónomo dé como distancia unos 13.000 millones de años luz (es lo que se llama distancia por tiempo de viaje de la luz), mientras que otros den para el mismo objeto 29.000 millones de años luz (esta es la denominada distancia por comovimiento).

Los descubrimientos de Hubble han pasado a conocerse como ley de Hubble: la

velocidad a la que las galaxias se alejan de nosotros es directamente proporcional a su distancia de nosotros. Cuanto más lejos está una galaxia, más rápido se está alejando.

Medir las velocidades de las galaxias fue relativamente fácil: la magnitud del desplazamiento hacia el rojo se traduce inmediatamente en la velocidad de la galaxia. Sin embargo, obtener las distancias con precisión era otra cosa diferente. Esta fue la parte más difícil. Recuerda que la distancia a la nebulosa de Andrómeda que calculó Hubble era incorrecta por un factor de 2,5. Él ideó una ecuación bastante simple, $v = H_oD$, en la que v es la velocidad de una determinada galaxia, D es su distancia respecto a nosotros y H_o es una constante, conocida ahora como constante de Hubble. Hubble estimó que el valor de esta constante era 500, medida en unidades de kilómetros por segundo por megapársec (un megapársec son 3,26 millones de años luz). La imprecisión de esta constante es de alrededor del 10 por ciento. Así, por ejemplo, según Hubble, si una galaxia está a una distancia de cinco megapársecs, su velocidad relativa respecto a nosotros es de unos 2.500 kilómetros por segundo.

Claramente, el universo se está expandiendo con rapidez. Pero esto no es todo lo que el descubrimiento de Hubble reveló. Si conocías el valor real de la constante de Hubble, podías dar marcha atrás al reloj y calcular el tiempo transcurrido desde el big bang y, por tanto, la edad del universo. El propio Hubble calculó que el universo tenía unos 2.000 millones de años. Este cálculo chocaba con la edad de la Tierra, que los geólogos entonces cifraban en más de 3.000 millones de años. Esto desconcertó mucho a Hubble, y con razón. Por supuesto, no era consciente de los varios errores sistemáticos en que estaba incurriendo: no solo estaba confundiendo distintos tipos de variables Cefeidas en algunos casos, sino que también confundió nubes de gas en las que se estaban formando estrellas con estrellas brillantes en galaxias lejanas.

Una forma de valorar el progreso en la medición de distancias estelares en los últimos ochenta años es repasar la historia de la propia constante de Hubble. Los astrónomos han estado esforzándose por fijar el valor de la constante de Hubble durante casi un siglo, lo que ha provocado no solo la reducción a una séptima parte del valor de la constante, algo que ha hecho que aumentase de forma espectacular

el tamaño del universo, sino que también ha alterado la edad del universo, de los 2.000 millones de años que Hubble calculó originalmente a nuestra estimación actual de casi 14.000 millones de años (en realidad, 13.750 ± 110 millones de años). Ahora, por fin, basándonos en parte en las observaciones del fabuloso telescopio orbital que lleva el nombre de Hubble, hemos alcanzado un consenso sobre el valor de la constante de Hubble: 70,4 ± 1,4 kilómetros por segundo por megapársec. La imprecisión es solo del 2 por ciento, ¡algo increíble!

Piénsalo. Las mediciones del paralaje, desde 1838, se convirtieron en la base para el desarrollo de instrumentos y herramientas matemáticas para llegar a miles de millones de años luz, hasta los confines del universo observable.

A pesar de todo nuestro extraordinario progreso para resolver misterios como este, aún quedan por supuesto muchísimos más por aclarar. Podemos medir la proporción de materia oscura y de energía oscura en el universo, pero no tenemos ni idea de lo que son. Conocemos la edad del universo, pero seguimos preguntándonos si tendrá un final y cuándo llegará. Podemos hacer mediciones muy precisas de la atracción gravitatoria, del electromagnetismo y de las fuerzas nucleares débil y fuerte, pero no tenemos ni idea de si alguna vez se combinarán en una teoría unificada. Como tampoco tenemos ni idea de cuál es la probabilidad de que exista vida inteligente en nuestra galaxia o en alguna otra. Así que aún queda un largo camino por recorrer. Pero lo maravilloso es cuántas respuestas, y con qué extraordinario grado de precisión, nos han dado las herramientas de la física.

Capítulo 3

Cuerpos en movimiento

Es divertido intentar lo siguiente. Súbete a la báscula del baño. No una de esas lujosas que tienen los médicos en sus consultas ni uno de esos aparatos digitales de cristal que tienes que pulsar con tus pies para que se encienda; una báscula normal y corriente. Da igual si llevas puestos los zapatos (no tienes que impresionar a nadie) y no importa qué número aparezca ni si te gusta o no. Ponte rápidamente de puntillas y mantente así. Verás que la báscula se vuelve un poco loca. Puede que tengas que repetirlo unas cuantas veces para darte cuenta de lo que está pasando, porque todo sucede muy rápido.

Primero la aguja sube, ¿no? Después baja mucho antes de volver a tu peso, donde se encontraba antes de que te movieses, aunque, dependiendo de tu báscula, la aguja (o el disco numerado) puede que oscile un poco antes de estabilizarse. Después, cuando bajas los talones, sobre todo si lo haces rápido, la aguja primero baja y después sube más allá de tu peso antes de pararse en el peso que puede que quisieses saber o no. ¿Qué está pasando aquí? A fin de cuentas, pesas lo mismo cuando bajas los talones o si te pones de puntillas, ¿verdad? ¿O no?

Para aclarar el asunto necesitamos recurrir, créetelo, a sir Isaac Newton, mi candidato a mejor físico de todos los tiempos. Algunos de mis colegas no están de acuerdo, y es fácil argumentar que es Albert Einstein, pero nadie pone en duda que Einstein y Newton son los dos mejores. ¿Por qué voto por Newton? Porque sus descubrimientos fueron al mismo tiempo muy fundamentales y muy diversos. Estudió la naturaleza de la luz y desarrolló la teoría del color. Para estudiar el movimiento de los planetas construyó el primer telescopio de reflexión, lo que supuso un importante avance respecto a los telescopios de refracción de su época, e incluso hoy en día casi todos los grandes telescopios siguen los principios básicos de su diseño. Al estudiar las propiedades del movimiento de los fluidos, abrió una nueva e importante área de la física y consiguió calcular la velocidad del sonido (solo se equivocó en un 15 por ciento). Newton incluso inventó una nueva rama de las matemáticas, el cálculo. Por suerte, no tenemos que recurrir al cálculo para apreciar sus mayores logros, que han acabado conociéndose como las leyes de

Newton. Espero ser capaz de mostrarte en este capítulo el gran alcance de estas leyes aparentemente sencillas.

Las tres leyes del movimiento de Newton

La primera ley afirma que un cuerpo en reposo continuará en su estado de reposo y un cuerpo en movimiento continuará en su estado de movimiento en la misma dirección y con la misma velocidad, a menos que, en cualquiera de los dos casos, una fuerza actúe sobre él. O, en palabras del propio Newton: «Un cuerpo en reposo persevera en su estado de reposo, o de movimiento uniforme y rectilíneo, salvo que las fuerzas que actúen sobre él le obliguen a cambiar de estado». Esta es la ley de la inercia.

El concepto de inercia nos resulta familiar, pero si lo piensas un poco te darás cuenta de lo poco intuitivo que es en realidad. Ahora aceptamos esta ley como algo normal, aunque vaya claramente en contra de nuestra experiencia diaria. A fin de cuentas, las cosas que se mueven rara vez lo hacen en línea recta. Y, desde luego, no suelen seguir moviéndose indefinidamente. Esperamos que se paren en algún momento. A ningún golfista se le habría ocurrido la ley de la inercia, ya que muy pocos putts van en línea recta y demasiados se paran bastante antes del hoyo. Lo que era y sigue siendo intuitivo es lo contrario: que las cosas tienden naturalmente al reposo, idea que dominó el pensamiento occidental durante miles de años hasta el gran avance de Newton.

Newton cambió nuestra forma de entender el movimiento de los objetos, al explicar que la razón por la que una bola de golf suele pararse antes de llegar al hoyo es que la fuerza de rozamiento la está frenando, y que el motivo por el que la Luna no sale disparada hacia el espacio, sino que sigue dando vueltas alrededor de la Tierra, es que la fuerza de la gravedad la mantiene en órbita.

Para entender la realidad de la inercia de una forma más intuitiva, piensa en lo difícil que puede ser hacer el giro al final de la pista cuando estás patinando sobre hielo: tu cuerpo quiere seguir recto y tienes que aprender a aplicar la fuerza justa en tus patines en el ángulo preciso para cambiar de dirección sin perder el control o chocar con la pared. O, si esquías, piensa en lo difícil que puede ser cambiar de dirección rápidamente para evitar a otro esquiador que se cruza de pronto en tu

camino. La razón por la que en esas situaciones notamos la inercia mucho más de lo normal es que en ambos casos hay muy poco rozamiento que nos frene y nos ayude a cambiar nuestro movimiento. Imagínate que los greens de los campos de golf fuesen de hielo; entonces serías muy consciente de hasta qué punto la bola desea seguir moviéndose y moviéndose.

Piensa en lo revolucionaria que fue esta idea. No solo echó por tierra toda la forma de pensar anterior, sino que marcó el camino para descubrir una serie de fuerzas que actúan sobre nosotros todo el tiempo pero que son invisibles, como el rozamiento, la gravedad y las fuerzas eléctricas y magnéticas. Esta aportación fue tan importante que en física la unidad de fuerza es el newton. Pero Newton no solo nos permitió «ver» estas fuerzas ocultas; también nos enseñó a medirlas.

Con la segunda ley, nos proporcionó una directriz extraordinariamente sencilla pero potente para calcular las fuerzas. La segunda ley es la famosa F = ma, considerada por algunos como la ecuación más importante de toda la física. Que traducida significa: la fuerza neta, F, sobre un objeto es igual a la masa del objeto, m, multiplicada por su aceleración neta, a. Como ejemplo de que esta fórmula resulta útil en nuestra vida diaria, veamos el caso de una máquina de rayos X. Es fundamental determinar cuál debe ser el rango de energías de los rayos X que se quieren generar. Veamos cómo la ecuación de Newton nos permite hacerlo.

Uno de los mayores hallazgos en la física —que veremos con más detalle más adelante— es que una partícula cargada (por ejemplo, un electrón, un protón o un ion) experimenta una fuerza cuando entra en un campo eléctrico. Si conocemos la carga de la partícula y la intensidad del campo eléctrico, podemos calcular la fuerza eléctrica que actúa sobre la partícula. Una vez que conocemos la fuerza, utilizando la segunda ley de Newton podemos calcular la aceleración de la partícula[5].

En una máquina de rayos X los electrones se aceleran antes de chocar contra un blanco dentro del tubo de rayos X. La velocidad con la que los electrones golpean el blanco determina el rango de energía de los rayos X que se producen. Cambiando la intensidad del campo eléctrico podemos cambiar la aceleración de los electrones. Por tanto, puede controlarse la velocidad con la que los electrones golpean el blanco

[5] He supuesto que la fuerza sobre la partícula cargada debida a la gravedad es tan pequeña que puede despreciarse.

para seleccionar el rango de energía deseado para los rayos X.

Para facilitar los cálculos, los físicos utilizan como unidad de fuerza el newton (un newton es la fuerza que acelera un kilogramo a un metro por segundo al cuadrado). ¿Por qué decimos «por segundo al cuadrado»? Porque, cuando existe aceleración, la velocidad cambia constantemente, por lo que, en otras palabras, sigue variando tras el primer segundo. Si la aceleración es constante, la velocidad cambia en la misma cantidad cada segundo.

Para ver esto con más claridad, imagina por ejemplo que lanzamos una bola de bolos desde un edificio alto en Manhattan (¿por qué no desde el mirador del Empire State?). Se sabe que la aceleración de los objetos lanzados en la Tierra es aproximadamente de 9,8 metros por segundo al cuadrado. Se llama aceleración de la gravedad y se representa como g. (Para simplificar, voy a ignorar de momento el rozamiento del aire; luego veremos más al respecto.) Tras el primer segundo, la bola lleva una velocidad de 9,8 metros por segundo. Al final del segundo segundo, habrá acumulado unos 9,8 metros por segundo de velocidad adicionales, por lo que se estará moviendo a 19,6 metros por segundo. Al final del tercer segundo irá a 29,4 metros por segundo. La bola tarda unos ocho segundos en llegar al suelo. Su velocidad entonces es de unas ocho veces 9,8, es decir, 78 metros por segundo (unos 280 kilómetros por hora.)

¿Qué hay de cierto en la idea tan repetida de que si tiras un centavo desde lo más alto del Empire State podría matar a alguien? De nuevo, no tendré en cuenta el efecto del rozamiento del aire, aunque quiero que quede claro que en este caso sería importante. Pero, incluso sin tenerlo en cuenta, si un centavo te golpea a 280 kilómetros por hora es poco probable que te mate.

Este es un buen sitio para tratar un asunto que aparecerá una y otra vez a lo largo del libro, sobre todo porque aparece una y otra vez en física: la diferencia entre masa y peso. Fíjate en que Newton usó la masa en su ecuación en lugar del peso y, aunque podrías pensar que son lo mismo, en realidad son fundamentalmente diferentes. En general utilizamos como unidades de peso la libra y el kilogramo (la unidad que utilizaremos en este libro), pero lo cierto es que son unidades de masa.

La diferencia en realidad es sencilla. Tu masa es la misma independientemente de dónde estés en el universo. Sí, eso es, en la Luna, en el espacio exterior o en la

superficie de un asteroide. Lo que cambia es tu peso. Entonces, ¿qué es el peso? Aquí las cosas se complican un poco. El peso es el resultado de la atracción gravitatoria. El peso es una fuerza: es la masa multiplicada por la aceleración de la gravedad (F = mg). Así que nuestro peso varía dependiendo de la fuerza con que la gravedad actúa sobre nosotros, por eso los astronautas pesan menos en la Luna. La gravedad de la Luna es alrededor de una sexta parte de la de la Tierra, así que en la Luna los astronautas pesan una sexta parte de lo que pesan en la Tierra.

Para una masa determinada, la atracción gravitatoria de la Tierra es aproximadamente la misma, independientemente del lugar de su superficie en el que estés. Así que se puede decir: «Ella pesa cincuenta y cinco kilos» o «Él pesa ochenta kilogramos», aunque al hacerlo estemos confundiendo dos categorías (masa y peso). Estuve un buen rato dudando si utilizar en este libro la unidad técnica en física para la fuerza (y, por tanto, el peso) en lugar de los kilos y las libras, pero decidí que no porque resultaría demasiado confuso. Nadie, ni siquiera un físico cuya masa fuese de ochenta kilos diría: «Peso setecientos ochenta y cuatro newtons» (80 × 9,8 = 784). Así que en vez de eso te pediré que recuerdes la diferencia e insistiremos en ello en breve, cuando volvamos sobre el misterio de por qué una báscula se vuelve loca cuando nos ponemos de puntillas sobre ella.

El hecho de que la aceleración de la gravedad sea a efectos prácticos la misma en cualquier lugar de la Tierra explica un misterio del que probablemente hayas oído hablar: los objetos con diferentes masas caen a la misma velocidad. Una famosa historia sobre Galileo, que apareció por primera vez en una antigua biografía suya, cuenta que hizo un experimento desde lo más alto de la torre de Pisa en el que dejó caer a la vez una bala de cañón y una bola de madera más pequeña. Su intención, se supone, era demostrar que era falsa la afirmación, atribuida a Aristóteles, de que los objetos más pesados caerían más rápido que los más ligeros. Esta anécdota se cuestionó hace tiempo, y ahora parece bastante claro que Galileo nunca llevó a cabo ese experimento, pero sigue siendo una buena historia, tanto que es de todos conocido que el comandante de la misión lunar Apolo 15, David Scott, lanzó un martillo y una pluma de halcón a la superficie de la Luna al mismo tiempo para ver

si objetos con distinta masa caían al suelo a la misma velocidad en el vacío[6].

Para mí, lo sorprendente del vídeo es lo despacio que caen ambos objetos. De primeras, esperarías que ambos cayesen rápido, desde luego al menos el martillo. Pero los dos caen despacio porque la aceleración de la gravedad en la Luna es unas seis veces menor que en la Tierra.

¿Por qué tenía razón Galileo al pensar que dos objetos con diferente masa caerían a la vez? La razón es que la aceleración gravitatoria es la misma para todos los objetos. Según la ecuación $F = ma$, cuanto mayor sea la masa mayor será la fuerza gravitatoria, pero la aceleración es la misma para todos los objetos. Por tanto, llegan al suelo con la misma velocidad. Por supuesto, el objeto con una masa mayor tendrá más energía y por tanto su impacto será mayor.

Es importante señalar que la pluma y el martillo no caerían a la vez si hicieses el experimento en la Tierra. Esto se debe al rozamiento del aire, que hasta ahora no hemos tenido en cuenta. El rozamiento del aire es una fuerza que se opone al movimiento de los objetos. Además, el viento habría tenido un efecto mucho mayor sobre la pluma que sobre el martillo.

Esto nos lleva a una característica muy importante de la segunda ley. La palabra neta en la ecuación tal como se describe más arriba es fundamental, porque en la naturaleza casi siempre actúa más de una fuerza sobre un objeto y hay que tenerlas todas en cuenta. Eso significa que hay que sumar las fuerzas, cosa que no es tan sencilla, porque las fuerzas son lo que llamamos vectores. Esto significa que tienen una magnitud y una dirección, lo que implica que, para calcular la fuerza neta, no se puede hacer un cálculo como 2 + 3 = 5. Supón que sobre una masa de 4 kilogramos actúan solo dos fuerzas; una fuerza de 3 newtons hacia arriba y otra de 2 newtons hacia abajo. La suma de estas dos fuerzas es de un newton hacia arriba y, según la segunda ley de Newton, el objeto se acelerará hacia arriba a 0,25 metros por segundo al cuadrado.

La suma de las dos fuerzas puede incluso ser nula. Si coloco un objeto de masa m sobre la mesa, según la segunda ley de Newton, la fuerza gravitatoria sobre él es mg newtons (masa × aceleración de la gravedad) hacia abajo. Como el objeto no se está acelerando, la fuerza neta sobre él ha de ser nula. Eso significa que debe haber

---

[6] Hay un vídeo maravilloso, que puedes ver en http://video.google.com/videoplay?docid=6926891572259784994#.

otra fuerza de mg newtons hacia arriba. Esta es la fuerza con la que la mesa empuja el objeto hacia arriba. ¡Una fuerza de mg hacia abajo y otra de mg hacia arriba se suman para dar una fuerza nula!

Esto nos conduce a la tercera ley de Newton: «*A cada acción le corresponde siempre una reacción igual y en la dirección opuesta*». Esto significa que las fuerzas que dos objetos ejercen el uno sobre el otro son siempre iguales pero en direcciones opuestas. Como me gusta decir a mí, la acción es igual a menos la reacción, o, como se conoce más popularmente: «*Para toda acción hay una reacción igual y opuesta*».

Algunas de las consecuencias de esta ley son intuitivas: un rifle da un culatazo contra tu hombro cuando lo disparas. Pero piensa también que, cuando te apoyas en una pared, esta también te empuja a ti en dirección opuesta exactamente con la misma fuerza. La tarta de fresas que tomaste en tu cumpleaños empujaba hacia abajo la bandeja, que a su vez empujaba la tarta hacia arriba con una fuerza de la misma magnitud. De hecho, por extraña que parezca la tercera ley, estamos completamente rodeados de ejemplos en los que entra en acción.

¿Alguna vez has abierto un grifo conectado a una manguera que estaba en el suelo y has visto cómo la manguera serpenteaba de un lado a otro, y con un poco de suerte has mojado a tu hermano pequeño? ¿Por qué sucede esto? Porque, a medida que el agua es empujada fuera de la manguera, también el agua empuja la manguera, y el resultado es que la manguera suelta latigazos a diestro y siniestro. O seguro que has hinchado un globo y luego lo has soltado para ver cómo salía disparado por la habitación. Lo que sucede es que el globo está expulsando el aire, y este, al salir, empuja el globo, haciendo que salga volando en una versión aérea de la manguera serpenteante. Esto no es distinto del principio en que se basan los aviones a reacción y los cohetes. Expulsan gas a mucha velocidad y eso hace que se muevan en la dirección opuesta.

Para entender realmente lo extraña y profunda que es esta idea, piensa qué es lo que las leyes de Newton nos dicen que sucede si lanzamos una manzana desde lo alto de un edificio de treinta pisos. Sabemos que la aceleración será g, unos 9,8 metros por segundo al cuadrado. Supongamos que la manzana tiene una masa aproximada de medio kilogramo. Aplicando la segunda ley, $F = ma$, resulta que la

Tierra atrae la manzana con una fuerza de 0,5 × 9,8 = 4,9 newtons. Hasta aquí todo bien.

Pero ahora piensa en lo que exige la tercera ley: que, si la Tierra atrae la manzana con una fuerza de 4,9 newtons, la manzana atraerá la Tierra con una fuerza de 4,9 newtons. Así que, cuando la manzana cae sobre la Tierra, la Tierra cae sobre la manzana. Esto parece absurdo, ¿verdad? Pero espera un momento. Como la masa de la Tierra es muchísimo más grande que la de la manzana, los números se disparan. Como sabemos que la masa de la Tierra es alrededor de 6×10^{24} kilogramos, podemos calcular cuánto cae hacia arriba hacia la manzana: unos 10^{-22} metros, alrededor de una diezmillonésima parte del tamaño de un protón, una distancia tan pequeña que ni siquiera se puede medir; en la práctica es insignificante.

Esta idea de que la fuerza entre dos cuerpos es igual y en direcciones opuestas aparece por todas partes en nuestras vidas y es la razón por la que la báscula se vuelve loca cuando te pones de puntillas sobre ella. Lo que nos lleva de nuevo al asunto de qué es el peso y nos permite entenderlo algo mejor.

Cuando te subes a la báscula del baño, la gravedad te empuja hacia abajo con una fuerza mg (donde m es tu masa) y la báscula te empuja hacia arriba con la misma fuerza, de forma que la fuerza neta que actúa sobre ti es cero. Esta fuerza hacia arriba es la que mide en realidad la báscula, y la que registra tu peso. Recuerda, peso no es lo mismo que masa. Para que cambie tu masa, tendrías que ponerte a dieta (o podrías hacer lo contrario y comer más, claro), pero tu peso puede cambiar de una manera mucho más fácil.

Supongamos que tu masa (m) es de 55 kilogramos. Cuando estás sobre la báscula en el baño, empujas la báscula hacia abajo con una fuerza mg y la báscula te empuja a ti a su vez con la misma fuerza, mg. La fuerza neta sobre ti es cero. La fuerza con la que la báscula te empuja a ti es lo que ves en su escala.

Ahora vamos a pesarte en un ascensor. Cuando el ascensor está quieto (o mientras se mueve a velocidad constante), no estás acelerando (ni el ascensor tampoco) y la báscula marcará que pesas 55 kilos, como en el baño. Entramos en el ascensor (que está en reposo), te subes a la báscula e indica 55 kilos. Pulso el botón para ir al piso más alto y el ascensor acelera hacia arriba brevemente para ganar velocidad.

Supongamos que esta aceleración es de dos metros por segundo al cuadrado y que es constante. Durante el breve lapso en que el ascensor acelera, la fuerza neta sobre ti no puede ser cero. Según la segunda ley de Newton, la fuerza neta, Fneta, que actúa sobre ti ha de ser $F_{neta} = ma_{neta}$. Como la aceleración neta es de dos metros por segundo al cuadrado, la fuerza neta sobre ti es $2 \times m$ hacia arriba. Puesto que la fuerza de la gravedad sobre ti es mg hacia abajo, tiene que actuar sobre ti una fuerza $mg + 2m$, que también puede escribirse como $m(g + 2)$, hacia arriba. ¿De dónde proviene esta fuerza? Debe venir de la báscula (¿de dónde si no?). La báscula ejerce sobre ti una fuerza $m(g + 2)$ hacia arriba. Pero recuerda que el peso que marca la báscula es la fuerza con la que te empuja hacia arriba. Por tanto, la báscula te dice que tu peso es de unos 65 kilos (recuerda que g es aproximadamente diez metros por segundo al cuadrado). ¡Has ganado bastante peso!

Según la tercera ley de Newton, si la báscula ejerce sobre ti una fuerza de $m(g + 2)$ hacia arriba, tú debes ejercer la misma fuerza sobre la báscula hacia abajo. Podrías pensar que, si la báscula te empuja con la misma fuerza con que tú la empujas a ella, la fuerza neta que actúa sobre ti es cero y, por tanto, no puedes sufrir aceleración. Si sigues este razonamiento, cometes un error muy común. Solo actúan dos fuerzas sobre ti: mg hacia abajo, debida a la gravedad, y $m(g + 2)$ hacia arriba, debida a la báscula, y por tanto la fuerza neta que actúa sobre ti es $2m$ hacia arriba, que te acelerará a dos metros por segundo al cuadrado.

En cuanto el ascensor deja de acelerar, tu peso vuelve a su valor normal. Por tanto, solo aumenta durante el breve lapso en que el ascensor acelera hacia arriba.

Deberías ser capaz de deducir que si el ascensor se acelera hacia abajo perderás peso. Mientras la aceleración hacia abajo es de dos metros por segundo al cuadrado, la báscula marcará que tu peso es $m(g - 2)$, unos 44 kilos. Un ascensor que sube debe detenerse, por lo que sufrirá una breve aceleración hacia abajo antes de pararse. Por tanto, casi al final de tu recorrido en el ascensor observarás que pierdes peso, ¡puede que lo agradezcas! Sin embargo, poco después el ascensor se habrá detenido y tu peso volverá a la normalidad (55 kilos).

Imagínate ahora que alguien a quien le caes realmente mal corta el cable y empiezas a caer por el hueco del ascensor, con una aceleración g. Supongo que en

ese momento no te daría por pensar en física, pero sería un experimento (brevemente) interesante. Tu peso sería $m(g - g) = 0$; no pesarías nada. Como la báscula está cayendo con la misma aceleración que tú, ya no ejerce sobre ti una fuerza hacia arriba. Si mirases hacia la báscula, marcaría cero. En realidad, estarías flotando junto con todo lo que hubiese en el ascensor. Si tuvieses un vaso de agua podrías darle la vuelta y el agua no se caería, ¡aunque, por supuesto, te recomiendo que no intentes comprobarlo!

Esto explica por qué los astronautas flotan en sus naves. Cuando un módulo espacial, o el transbordador espacial, está en órbita, en realidad se encuentra en caída libre, igual que la caída libre del ascensor. ¿Qué significa exactamente caída libre? Puede que la respuesta te sorprenda. La caída libre se produce cuando la única fuerza que actúa sobre ti es la gravitatoria. En órbita, los astronautas, la nave espacial y todo lo que hay dentro de ella están precipitándose hacia la Tierra en caída libre. Los astronautas no acaban espachurrados porque la Tierra es redonda y tanto ellos como la nave espacial y todo lo que contiene se mueven tan rápido mientras caen hacia la superficie terrestre que la curvatura de esta evita que lleguen a chocar nunca.

Así que los astronautas en el transbordador están en ingravidez. Si estuvieses allí, pensarías que no hay gravedad; al fin y al cabo, nada de lo que hay en el transbordador pesa. Se suele decir que el transbordador en órbita es un entorno de gravedad cero, ya que eso es lo que se siente, pero si no hubiese gravedad el transbordador no se mantendría en órbita.

La idea del cambio de peso es tan fascinante que quise demostrar este fenómeno —incluso la ingravidez— en clase. ¿Y si me subiese a una mesa con una báscula firmemente atada a mis pies? Pensé que entonces quizá podría mostrarles a mis alumnos de alguna forma —montando una cámara especial— que, durante el medio segundo o así en que estuviese en caída libre, la báscula marcaría cero. Te recomendaría que lo probases, pero no merece la pena, créeme, lo he intentado muchas veces y solo he conseguido romper muchas básculas. El problema es que las básculas que puedes comprar en una tienda no reaccionan lo suficientemente rápido, por la inercia de sus muelles. ¡Una de las leyes de Newton pone trabas a la otra! Si pudieses saltar desde un edificio de treinta pisos, probablemente te daría

tiempo a ver el efecto (tendrías unos 4,5 segundos), pero evidentemente ese experimento presentaría otros problemas.

Así que en lugar de romper básculas o saltar desde edificios, he aquí algo que puedes intentar en tu jardín para experimentar la ingravidez, si tienes una mesa de terraza y unas buenas rodillas. Yo lo hago desde la mesa de laboratorio frente a mis alumnos. Súbete a la mesa y sostén una garrafa de agua de tres o cinco litros con las manos extendidas, meciéndola ligeramente, sin sostenerla por los lados. Tiene que estar sobre las manos. Ahora salta de la mesa y, mientras estás en el aire, verás que la garrafa flota sobre tus manos. Si puedes hacer que un amigo te grabe digitalmente mientras saltas y después lo reproduces a cámara lenta, verás con claridad que la garrafa flota. ¿Por qué? Porque cuando te aceleras hacia abajo, la fuerza con la que estabas empujando la garrafa hacia arriba para mantenerla sobre las manos se ha anulado. La garrafa se acelerará a 9,8 metros por segundo al cuadrado, igual que tú. Tanto la garrafa como tú estáis en caída libre.

Pero ¿cómo explica todo esto por qué tu báscula se vuelve loca cuando te subes a ella de puntillas? Cuando te impulsas hacia arriba, aceleras hacia arriba, y la fuerza con la que la báscula te empuja aumenta. Así que pesas más durante un breve instante. Pero después, ya de puntillas, te deceleras para pararte, y eso significa que tu peso disminuye. Luego, cuando bajas los talones, el proceso se repite a la inversa, y así acabas de demostrar cómo, sin cambiar en absoluto tu masa, puedes conseguir pesar más o menos durante un instante.

La ley de la gravitación universal: Newton y la manzana

La gente suele hablar de las tres leyes de Newton, pero, en realidad, él formuló cuatro. Todos hemos oído la historia según la cual Newton observó un día cómo caía una manzana en su huerto. Uno de sus primeros biógrafos afirmó que el propio Newton contaba la historia. «Fue debido a la caída de una manzana —escribió el amigo de Newton William Stukeley, citando una conversación que tuvo con Newton—, mientras estaba sentado en un estado contemplativo. "¿Por qué caerá la manzana siempre perpendicularmente al suelo?", pensó para sí»[7]. Pero muchos

[7] La Royal Society publicó recientemente en internet una imagen digital del manuscrito de Stukeley, que puedes encontrar en http://royalsociety.org/turning-the-pages/.

siguen pensando que la historia no es real. A fin de cuentas, Newton le contó la historia a Stukeley solo un año antes de morir y no la mencionó en ningún otro pasaje de sus voluminosos escritos.

Aun así, lo que es cierto sin ninguna duda es que Newton fue el primero en darse cuenta de que la misma fuerza que hace que una manzana caiga de un árbol rige el movimiento de la Luna, la Tierra, el Sol y, de hecho, todos los objetos del universo. Esta era una idea extraordinaria, pero, una vez más, Newton no se detuvo aquí. Se dio cuenta de que cada objeto en el universo atrae a todos los demás e inventó una fórmula para calcular la intensidad de la atracción, conocida como su ley de la gravitación universal. Esta ley afirma que la fuerza de atracción gravitatoria entre dos objetos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

En otras palabras, por poner un ejemplo completamente hipotético que, insisto, no tiene ninguna relación con la realidad, si la Tierra y Júpiter orbitasen alrededor del Sol a la misma distancia, como Júpiter es unas 318 veces más masivo que la Tierra, la fuerza gravitatoria entre el Sol y Júpiter sería unas 318 veces mayor que entre el Sol y la Tierra. Y si Júpiter y la Tierra tuviesen la misma masa, pero Júpiter estuviese en su órbita real, que está unas cinco veces más alejada del Sol que la terrestre, entonces, debido a que la fuerza gravitatoria es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, sería 25 veces mayor entre el Sol y la Tierra que entre el Sol y Júpiter.

En los famosos *Philosophiæ naturalis principia mathematica* de Newton, publicados en 1687 —que ahora conocemos como los *Principia*— no utilizó una ecuación para presentar la ley de la gravitación universal, pero esta es hoy en día la forma más habitual de expresarla en física:

$$F_{grav} = G\frac{m_1 m_T}{r^2}$$

donde F_{grav} es la fuerza de atracción gravitatoria entre un objeto de masa m_1 y otro de masa m_2 y r es la distancia entre ellos; el 2 significa «al cuadrado». ¿Qué es la G? Es lo que se llama constante gravitatoria. Newton sabía, desde luego, que esa constante existía, pero no la menciona en sus Principia. A partir de las muchas

mediciones que se han hecho desde entonces, sabemos ahora que el valor más preciso para *G* es 6,67428 ± 0,00067 × 10^{-11}.[8] Los físicos también creemos, como conjeturó Newton, que su valor es constante en todo el universo.

El impacto de las leyes de Newton fue gigantesco y no puede sobrestimarse. Sus Principia se cuentan entre las obras de ciencia más importantes jamás escritas. Sus leyes cambiaron la física y la astronomía por completo. Permitieron calcular la masa del Sol y de los planetas. La forma de hacerlo es muy hermosa. Si conoces el período orbital de cualquier planeta (por ejemplo, Júpiter o la Tierra) y conoces su distancia al Sol, puedes calcular la masa del Sol. ¿No suena a magia? Podemos ir un paso más allá: si conoces el período orbital de una de las lunas brillantes de Júpiter (descubiertas por Galileo en 1609) y conoces la distancia entre Júpiter y esa luna, puedes calcular la masa de Júpiter. Por tanto, si conoces el período orbital de la Luna alrededor de la Tierra (es de 27,32 días) y conoces la distancia media entre la Tierra y la Luna (es de unos 385.000 kilómetros), puedes calcular con un alto grado de precisión la masa de la Tierra. En el Apéndice 2 te enseño cómo hacerlo. ¡Si te van las matemáticas puede que lo disfrutes!

Pero las leyes de Newton van mucho más allá de nuestro sistema solar. Rigen y explican el movimiento de las estrellas, las estrellas binarias (véase el capítulo 13), los cúmulos de estrellas, las galaxias e incluso los cúmulos de galaxias, y a ellas debemos el descubrimiento en el siglo XX de lo que denominamos materia oscura. Luego te contaré más al respecto. Sus leyes son al mismo tiempo hermosas, extraordinariamente sencillas e increíblemente potentes. Explican muchas cosas y aclaran una variedad alucinante de fenómenos.

Al tratar en conjunto la física del movimiento, la interacción entre objetos y los desplazamientos de los planetas, Newton proporcionó un nuevo tipo de orden a las mediciones astronómicas, al poner de manifiesto las interconexiones entre lo que hasta entonces había sido un batiburrillo de observaciones confusas realizadas a lo largo de los siglos. Otros habían vislumbrado las mismas ideas, pero no habían sido capaces de hacer que encajaran.

Galileo, que murió un año antes de que Newton naciese, había ideado una versión

---

[8] Si alguna vez quieres utilizar este valor, comprueba que tus masas están en kilogramos y que la distancia, *r*, está en metros. En ese caso, la fuerza gravitatoria estará en newtons.

primitiva de la primera ley de Newton y podía describir matemáticamente el movimiento de muchos objetos. También descubrió que todos los objetos caían desde una misma altura con la misma velocidad (en ausencia del rozamiento del aire). Sin embargo, no supo explicar por qué sucedía esto. Johannes Kepler había entendido los principios básicos del comportamiento de los planetas en sus órbitas, pero no tenía ni idea de los motivos. Y, como hemos visto, las respuestas, y las muchas conclusiones a las que conducen, no son en absoluto intuitivas.

Las fuerzas del movimiento no dejan de fascinarme. La gravedad siempre nos acompaña; se extiende por todo el universo. Y lo asombroso —una de las cosas asombrosas— es que actúa a distancia. ¿Alguna vez te has parado realmente a pensar que nuestro planeta se mantiene en órbita y nosotros estamos vivos por la fuerza de atracción entre dos objetos que están a 150 millones de kilómetros?

Péndulos en movimiento

Aunque la gravedad es una fuerza omnipresente en nuestras vidas, sus efectos nos desconciertan de muchas maneras. Para sorprender a los alumnos y mostrarles lo poco intuitiva que es la gravedad, utilizo un péndulo. Esto es lo que hago.

Puede que muchos de vosotros penséis que si os montáis en un columpio junto a alguien mucho más ligero que vosotros, como un niño pequeño, os moveréis mucho más despacio que él. Pero no es así. Entonces, puede que os sorprenda que el tiempo que tarda el péndulo en completar su recorrido, lo que llamamos el período del péndulo, no depende del peso que cuelga de él (este peso se llama lenteja). Tened en cuenta que estoy hablando aquí de lo que se conoce como péndulo simple, lo que significa que cumple dos condiciones. Primero, el peso de la lenteja debe ser mucho mayor que el del hilo del péndulo, de forma que este pueda ignorarse. Segundo, el tamaño de la lenteja ha de ser lo suficientemente pequeño como para que pueda tratarse como un punto, de tamaño cero[9]. Es fácil construir un péndulo simple en casa: atad una manzana a un extremo de un hilo ligero que sea al menos cuatro veces más largo que el tamaño de la manzana.

A partir de las leyes del movimiento de Newton, deduzco en clase la ecuación para

[9] Si la masa del hilo no puede despreciarse y/o la lenteja no puede tratarse como una masa puntual, ya no se puede considerar un péndulo simple sino que se trata de un péndulo físico, que se comporta de una manera diferente.

calcular el período de un péndulo simple y a continuación pongo la ecuación a prueba. Para hacerlo, tengo que suponer que el ángulo de oscilación del péndulo es pequeño. Explicaré luego con más precisión qué quiero decir con esto. Cuando miras cómo tu péndulo casero oscila de un lado a otro, de derecha a izquierda y de izquierda a derecha, la mayor parte del tiempo verás el péndulo en movimiento, ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha. Sin embargo, hay dos instantes en cada oscilación completa en que el péndulo se detiene para a continuación cambiar de dirección. Cuando esto sucede, el ángulo entre el hilo y la vertical alcanza su valor máximo, que se conoce como amplitud del péndulo. Si se puede despreciar el rozamiento (fricción) del aire, ese ángulo máximo en el que el péndulo se detiene en el extremo izquierdo es el mismo que en el derecho. La ecuación que deduzco solo es válida para ángulos pequeños (amplitudes pequeñas). Es lo que en física llamamos una aproximación para ángulos pequeños. Los alumnos me preguntan: *«¿Cómo de pequeño es pequeño?»*. Una alumna es incluso más específica y pregunta: *«¿Se considera pequeña una amplitud de cinco grados? ¿La ecuación sigue siendo válida para una amplitud de diez grados, o diez grados ya no es un ángulo pequeño?»*. Desde luego, son muy buenas preguntas y les propongo que lo comprobemos en clase.

La ecuación que deduzco es bastante simple y muy elegante, aunque puede asustar un poco a quienes hace tiempo que no practican las matemáticas:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

donde T es el período del péndulo (en segundos), L es la longitud del hilo (en metros), π es 3,14 y g es la aceleración de la gravedad (9,8 metros por segundo al cuadrado). Así que el miembro derecho de la ecuación es dos veces π multiplicado por la raíz cuadrada de la longitud del hilo dividida por la aceleración de la gravedad. No entraré en detalles aquí sobre por qué esta es la ecuación correcta (puedes ver el proceso de deducción en la grabación de mis clases; el enlace al sitio web está más abajo).

Pongo aquí la ecuación para que veas con qué precisión la confirman mis demostraciones. La ecuación predice que un péndulo de un metro tiene un período de unos dos segundos. Mido el tiempo que tarda un péndulo, con un hilo de esa longitud, en completar diez oscilaciones. Dividiendo entre diez, obtenemos un período de dos segundos. Después utilizo un péndulo cuyo hilo es cuatro veces más corto. La ecuación predice que su período debe ser la mitad del anterior. Utilizo un hilo de 25 centímetros y, en efecto, tarda diez segundos en completar diez oscilaciones. Todo en orden.

Para probar la ecuación de una forma mucho más cuidadosa que utilizando el pequeño péndulo de la manzana, construí un péndulo simple en el aula: una cuerda de 5,18 metros de longitud con una lenteja esférica de acero de 15 kilogramos en un extremo. Lo llamo la madre de todos los péndulos[10].

¿Cuál debería ser el período, *T*, de este péndulo?

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{5{,}18}{9{,}8}}$$

que son 4,57 segundos. Para comprobarlo, como les prometí a mis alumnos, mido el período para una amplitud de cinco y de diez grados.

Utilizo un gran cronómetro digital que mis alumnos pueden ver y que muestra el tiempo con una precisión de centésimas de segundo. He comprobado en innumerables ocasiones a lo largo de los años que mi tiempo de reacción para encender y apagar el cronómetro es de una décima de segundo (si tengo un buen día). Esto significa que si repito la misma medición una docena de veces, los resultados que obtendré para el período variarán como mucho en 0,1 (quizá 0,15) segundos. Así que, independientemente de que mida lo que tarda el péndulo en dar una oscilación o en dar diez, lo haré con una imprecisión de ± 0,1 segundos. Por tanto, dejo que el péndulo oscile diez veces, ya que eso me permitirá obtener un valor del período diez veces más preciso que si solo dejo que oscile una vez.

Tiro de la lenteja lo suficiente para que el ángulo de la cuerda con la vertical sea de

---

[10] Puedes verlo casi al final de mi clase en http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-01-physics-i-classicalmechanics-fall-1999/video-lectures/embed10/.

unos cinco grados, la suelto y enciendo el cronómetro. La clase cuenta en voz alta cada una de las oscilaciones y tras diez, paro el cronómetro. Es asombroso: el cronómetro marca 45,70 segundos, diez veces mi estimación para una oscilación. La clase aplaude a rabiar.

Después aumento la amplitud a diez grados, suelto la lenteja, enciendo el cronómetro, pongo a la clase a contar y, al llegar a diez, paro el cronómetro: 45,75 segundos. 45,75 ± 0,1 segundos para diez oscilaciones se traduce en 4,575 ± 0,01 segundos por oscilación. El resultado para una amplitud de cinco grados es el mismo (teniendo en cuenta la imprecisión de las mediciones) que para una de diez grados. Así que mi ecuación sigue siendo muy precisa.

Entonces pregunto a la clase: «*Supongamos que me sentase sobre la lenteja y me balancease con ella, ¿obtendríamos el mismo período o cambiaría?*». Nunca me apetece sentarme sobre este chisme (duele de veras), pero, en nombre de la ciencia y para conseguir que los alumnos se rían y participen, no dejo pasar la ocasión. Obviamente, no me puedo sentar verticalmente sobre la lenteja, porque eso acortaría la longitud efectiva de la cuerda y reduciría un poco el período. Pero si pongo mi cuerpo tan horizontal como pueda, para estar al mismo nivel que la lenteja, consigo que la longitud de la cuerda siga siendo prácticamente la misma. Así que tiro de la lenteja hacia arriba, me la coloco entre las piernas, agarro la cuerda y me dejo ir. ¡Puedes verlo en la cubierta del libro!

No me resulta fácil arrancar y detener el cronómetro mientras cuelgo del péndulo sin incrementar mi tiempo de reacción. Sin embargo, lo he entrenado tantas veces que estoy bastante seguro de que puedo conseguir una imprecisión en mis mediciones de ± 0,1 segundos. Me balanceo diez veces, mientras los alumnos cuentan en voz alta —y se ríen de lo absurdo de mi situación mientras yo me quejo y gruño en voz alta— y, cuando paro el cronómetro tras diez oscilaciones, marca 45,61 segundos. Esto es, un período de 4,56 ± 0,01 segundos. «¡La física funciona!», grito, y los estudiantes se vuelven locos.

Abuelas y astronautas

Otro aspecto traicionero de la gravedad es que nos puede hacer pensar que tira en una dirección distinta de la real. La gravedad siempre tira hacia el centro de la

Tierra (en la Tierra, claro, en Plutón no). Pero a veces nos puede parecer que la gravedad opera horizontalmente y que esta gravedad artificial o percibida, como se denomina, desafía a la gravedad real.

Se puede demostrar esta gravedad artificial fácilmente haciendo algo que mi abuela solía hacer cada vez que preparaba ensalada. Mi abuela tenía ideas fantásticas (recuerda, es la que me enseñó que eres más alto cuando estás tumbado que cuando estás de pie). Cuando preparaba ensalada, lo pasaba realmente bien. Lavaba la lechuga en un colador y, en lugar de secarla con un paño, lo que habría estropeado las hojas, inventó su propia técnica: cubría el colador con un trapo sujeto con una goma y después lo agitaba furiosamente en círculos, muy rápido.

Por eso cuando hago esta demostración en clase no olvido decirles a los alumnos de las dos primeras filas que cierren sus cuadernos para que sus páginas no se mojen. Llevo lechuga a clase, la lavo cuidadosamente en el lavabo de mi mesa y la coloco en el colador. «Preparaos», les digo, y muevo mi brazo con fuerza haciendo círculos en vertical. ¡Saltan gotas de agua por todas partes! Hoy en día, por supuesto, utilizamos aburridos secadores de lechuga en lugar del método de mi abuela, lo cual me parece una verdadera lástima. ¡Hay tantas cosas en la vida moderna que parecen querer acabar con el romanticismo!

Esta misma gravedad artificial es la que experimentan los astronautas cuando están en órbita alrededor de la Tierra. Un amigo y colega del MIT, Jeffrey Hoffman, ha volado en cinco misiones del transbordador espacial y me cuenta que la tripulación experimenta una variedad de aceleraciones a lo largo del lanzamiento, desde 0,5·g al principio hasta 2,5·g durante la fase en que se acaba el combustible sólido. Después baja brevemente a 1 g, momento en que empieza a consumirse el combustible líquido y la aceleración alcanza 3·g durante el último minuto del lanzamiento, que dura en total unos ocho minutos y medio, hasta alcanzar unos 27.000 kilómetros por hora. Y no es nada cómodo. Cuando por fin entran en órbita, alcanzan la ingravidez, que perciben como gravedad cero.

Como sabes, tanto la lechuga, que siente cómo el colador la empuja, como los astronautas, que sienten cómo los asientos los empujan, experimentan un tipo de gravedad artificial. El invento de mi abuela y nuestros secadores de lechuga son evidentemente tipos de centrifugadoras, que separan la lechuga del agua adherida a

sus hojas, que sale despedida por los agujeros del secador. No hace falta que seas un astronauta para experimentar esta gravedad artificial. Acuérdate de la diabólica atracción de los parques de atracciones llamada Rotor, en la que estás de pie sobre una plataforma giratoria con la espalda pegada a una valla metálica. A medida que empieza a girar cada vez más rápido, sientes que te empuja con más fuerza contra la valla, ¿verdad? Según la tercera ley de Newton, tú empujas a la pared con la misma fuerza con que ella te empuja a ti.

Esta fuerza con la que la pared te empuja se llama fuerza centrípeta. Proporciona la aceleración necesaria para que des vueltas; cuanto más rápido vas, mayor es la fuerza centrípeta. Recuerda, si te mueves en círculos, debe existir una fuerza (y, por tanto, una aceleración), incluso si la magnitud de la velocidad no cambia. De forma similar, la gravedad produce la fuerza centrípeta para que los planetas giren alrededor del Sol, como explico en el Apéndice 2. La fuerza con la que empujas la pared se llama a menudo fuerza centrífuga. La fuerza centrípeta y la fuerza centrífuga tienen la misma magnitud pero direcciones opuestas. No las confundas: la única que actúa sobre ti es la fuerza centrípeta (no la centrífuga) y la única que actúa sobre la pared es la centrífuga (no la centrípeta).

Algunos Rotores pueden ir tan rápido como para abrir el suelo sobre el que te apoyas sin que te deslices hacia abajo. ¿Por qué no te deslizas?

Piénsalo. Si el Rotor no gira en absoluto, la fuerza de la gravedad hará que te deslices hacia abajo, ya que la fuerza de rozamiento entre la pared y tú (que será hacia arriba) no tiene magnitud suficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad. Sin embargo, la fuerza de rozamiento, cuando el suelo se abre, será mayor cuando el Rotor gira, ya que depende de la fuerza centrípeta. Cuanto mayor es la fuerza centrípeta (con el suelo bajado), mayor es la fuerza de rozamiento. Por lo tanto, si el Rotor gira con una velocidad suficiente con el suelo bajado, la fuerza de rozamiento será lo suficientemente grande como para compensar la fuerza de la gravedad y no te deslizarás hacia abajo.

Hay muchas maneras de demostrar la gravedad artificial. Esta la puedes probar en casa (bueno, en el jardín). Ata una cuerda al asa de una lata de pintura vacía y llénala de agua —hasta la mitad, si no pesará demasiado para hacerla girar— y hazla girar en círculos por encima de tu cabeza tan fuerte como puedas. Puede que

necesites practicar un poco para conseguir hacerlo suficientemente rápido. Una vez que lo consigas, verás que no se cae ni una gota. Hago que mis alumnos lo prueben en clase y debo decir que ¡es un desmadre! Este pequeño experimento también explica por qué, en algunas versiones especialmente perversas del Rotor, la cabina se da la vuelta de manera gradual hasta que en un momento dado estás cabeza abajo, pero no caes al suelo (por supuesto, por seguridad, también estás atado al aparato).

La fuerza con la que una báscula nos empuja determina el peso que indica. Es la fuerza de la gravedad —no su ausencia— la que hace que los astronautas sientan la ingravidez y, cuando una manzana cae sobre la Tierra, esta también cae sobre la manzana. Las leyes de Newton son sencillas, profundas, muy poco intuitivas y tienen consecuencias de gran alcance. Al deducir sus leyes, sir Isaac Newton se enfrentaba a un universo realmente misterioso y todos nos hemos beneficiado muchísimo de su capacidad para resolver algunos de estos misterios y hacernos ver el mundo de una manera radicalmente nueva.

Capítulo 4

La magia de beber con pajita

Para una de mis demostraciones favoritas en clase hacen falta dos latas de pintura y un rifle. Relleno una de las latas de agua hasta el borde y le pongo la tapa bien apretada. Después lleno la otra casi hasta arriba, pero dejando un par de centímetros de espacio por debajo del límite, y también la sello. Tras colocarlas una frente a la otra sobre una mesa, me alejo hasta una segunda mesa a varios metros de distancia, sobre la que hay una larga caja blanca de madera, que claramente cubre algún tipo de artilugio. Levanto la caja, dejando al descubierto un rifle colocado sobre un pedestal que apunta a las cajas. Los alumnos miran con asombro: ¿voy a disparar un rifle en clase?

«Si disparase una bala que atravesase estas latas de pintura, ¿qué sucedería?», les pregunto. No espero a que me respondan. Me agacho para comprobar el objetivo del rifle, normalmente mientras jugueteo un poco con el cerrojo. Esto ayuda a elevar la tensión. Soplo para quitarle el polvo a la recámara, meto una bala y anuncio: «Ahí va la bala. ¿Estamos preparados?». Entonces, de pie junto al rifle, pongo un dedo en el gatillo, cuento «tres, dos, uno» y disparo. Una de las latas vuela por los aires mientras la otra sigue en su sitio. ¿Cuál de las latas crees que pierde su tapa?

Para conocer la respuesta, primero tienes que saber que el aire es comprimible y el agua no. Las moléculas de aire pueden apretarse más las unas contra las otras, como las moléculas de cualquier gas, pero las del agua —como las de cualquier líquido— no. Son necesarias unas fuerzas y presiones enormes para cambiar la densidad de un líquido. Cuando la bala penetra en las latas de pintura, acarrea una gran presión. En la lata que tiene aire, este actúa como un cojín, absorbiendo el choque, de forma que el agua no se altera y la lata no explota. Pero, en la que está llena de agua, esta no se puede comprimir. Así que la presión adicional que la bala introduce en el agua ejerce una gran fuerza sobre las paredes y la tapa de la lata, que sale despedida. Como puedes imaginarte, es algo muy espectacular y mis alumnos siempre se quedan bastante impresionados.

Rodeado por la presión del aire

Siempre me divierto mucho en mis clases con la presión, y la presión del aire es particularmente entretenida por lo poco intuitiva que resulta. Ni siquiera nos damos cuenta de que la estamos sintiendo hasta que nos ponemos a buscarla, y entonces resulta asombrosa. Una vez que nos damos cuenta de que está ahí —y empezamos a entenderla—, comenzamos a ver pruebas de su existencia por todas partes, desde los globos a los barómetros, a cómo funciona una pajita o a la profundidad hasta la que puedes nadar y bucear en el mar.

Las cosas que no vemos al principio, y que damos por descontadas, como la gravedad y la presión del aire, resultan ser algunos de los fenómenos más fascinantes. Es como el chiste de los dos peces nadando tan contentos en un río. Uno le dice al otro, con mirada escéptica: «¿A qué vienen todos esos rumores sobre el "agua"?».

En nuestro caso, damos por descontados nuestro peso y la densidad de nuestra atmósfera invisible. En realidad vivimos en el fondo de un enorme océano de aire, que ejerce una gran presión sobre nosotros en todo instante, todos los días. Imagínate que pongo mi mano delante de mí con la palma hacia arriba. Ahora imagina un larguísimo tubo cuadrado de un centímetro de ancho (por cada lado, claro) apoyado en mi mano y que sube hasta lo más alto de la atmósfera. Más de 160 kilómetros. Solo el peso del aire dentro del tubo —olvídate del propio tubo— sería de un kilogramo[11]. Esa es una forma de medir la presión del aire: una presión de 1,03 kilogramos por centímetro cuadrado es lo que se conoce como una atmósfera estándar.

Otra forma de calcular la presión del aire —y cualquier otro tipo de presión— es mediante una ecuación bastante sencilla, tan sencilla que de hecho la he expresado en palabras sin decir que era una ecuación. La presión es la fuerza dividida por el área: $P = F/A$. Así, la presión del aire al nivel del mar es de alrededor de un kilogramo por centímetro cuadrado. He aquí otra forma de visualizar la relación entre fuerza, presión y área.

Imagina que estás patinando sobre un estanque helado y alguien se cae a través

[11] Recordad, científicos, que estoy utilizando un lenguaje común en lugar de técnico. Aunque el kilogramo es una unidad de masa y no de peso se suele utilizar para ambos, como estoy haciendo aquí.

del hielo. ¿Cómo te acercas al agujero?, ¿andando sobre el hielo? No, te tumbas boca abajo y te arrastras lentamente, distribuyendo la fuerza de tu cuerpo sobre el hielo en una superficie mayor, de forma que ejerzas menos presión sobre el hielo, haciendo que sea mucho menos probable que se rompa. La diferencia entre la presión que ejerces sobre el hielo cuando estás de pie y cuando estás tumbado es notable.

Supongamos que pesas setenta kilogramos y estás de pie sobre el hielo con los dos pies apoyados. Si tus pies tienen una superficie de 500 centímetros cuadrados (0,05 metros cuadrados), estás ejerciendo una presión de 70/0,05 kilogramos por metro cuadrado, es decir, 1.400 kilogramos por metro cuadrado. Si levantas un pie, habrás doblado la presión hasta 2.800 kilogramos por metro cuadrado. Si mides algo más de metro ochenta, como yo, y te tumbas sobre el hielo, ¿qué sucede? Que distribuyes los setenta kilogramos sobre unos 8.000 centímetros cuadrados, o alrededor de 0,8 metros cuadrados, y tu cuerpo ejerce una presión de solo 87,5 kilogramos por metro cuadrado, aproximadamente unas treinta y dos veces menos que cuando estabas apoyado en un solo pie. Cuanto mayor es el área menor es la presión, y viceversa, cuanto menor es el área mayor es la presión. Mucho de lo que tiene que ver con la presión es poco intuitivo.

Por ejemplo, la presión no tiene dirección. Sin embargo, la fuerza provocada por la presión sí la tiene; es perpendicular a la superficie sobre la que actúa la presión. Extiende la mano (con la palma hacia arriba) y piensa en la fuerza que se ejerce sobre ella (sin ningún tubo). El área de mi mano es de unos 150 centímetros cuadrados, así que debe existir una fuerza de 150 kilogramos que la empuja hacia abajo. Entonces, ¿por qué me cuesta tan poco sostenerla? Al fin y al cabo, no soy un forzudo. De hecho, si esa fuese la única fuerza no serías capaz de sostener ese peso con la mano. Pero hay más. Como la presión que ejerce el aire te rodea por todos lados, también hay una fuerza de 150 kilogramos que empuja hacia arriba el revés de tu mano. Por tanto, la fuerza neta sobre ella es nula.

Pero ¿cómo es que toda esa fuerza que la aprieta no acaba aplastando tu mano? Es evidente que los huesos de tu mano tienen suficiente resistencia para no ser aplastados. Imagínate un trozo de madera del tamaño de tu mano; desde luego, la presión atmosférica no lo aplasta.

¿Y mi pecho? Tiene un área de unos 1.000 centímetros cuadrados. Por tanto, la fuerza neta que ejerce sobre él la presión atmosférica es de 1.000 kilogramos: una tonelada métrica. La fuerza neta sobre mi espalda también sería de una tonelada. ¿Por qué no se hunden mis pulmones? La razón es que dentro de mis pulmones la presión del aire también es de una atmósfera. Por tanto, no hay diferencia de presión entre el aire dentro de mis pulmones y el que aprieta mi pecho desde fuera. Por eso puedo respirar con facilidad. Imagínate una caja de cartón, o de madera, o de metal, de dimensiones similares a las de tu pecho. Cierra la caja. El aire que está dentro de la caja es el aire que respiras, una atmósfera. La caja no se aplasta por el mismo motivo por el que tus pulmones no se hunden. Las casas no se derrumban bajo la presión atmosférica porque la presión del aire dentro es la misma que fuera; es lo que se llama equilibrio de presiones. La situación sería muy diferente si la presión del aire dentro de una caja (o una casa) fuese mucho menor de una atmósfera; puede que en ese caso sí se hundiese, como demuestro en clase. Luego hablaré más sobre ello.

Que normalmente no notemos la presión del aire no significa que no sea importante para nosotros. Al fin y al cabo, las previsiones meteorológicas hablan constantemente de sistemas de bajas y altas presiones. Lo único que sabemos es que un sistema de altas presiones suele traer días buenos y soleados, y un sistema de bajas presiones significa que se está acercando algún tipo de tormenta. Así que nos interesa mucho medir la presión del aire, pero, si no podemos sentirla, ¿cómo lo hacemos? Puede que sepas que lo hacemos con un barómetro, pero eso tampoco explica mucho, claro.

La magia de las pajitas

Comencemos con un pequeño truco que ya habrás hecho decenas de veces. Si pones una pajita en un vaso de agua, o, como me gusta hacer en clase, de zumo de arándanos, se llena de zumo. Si colocas el dedo sobre la pajita y empiezas a sacarla del vaso, el zumo sigue en la pajita, es casi mágico. ¿Por qué sucede esto? La explicación no es tan sencilla.

Para explicar por qué pasa esto, que nos ayudará a llegar al barómetro, necesitamos entender la presión en los líquidos. La presión causada únicamente por

líquido se denomina presión hidrostática (que en latín significa «agua en reposo»). Ten en cuenta que la presión total bajo la superficie de un líquido —por ejemplo, el océano— es la suma de la presión atmosférica por encima de la superficie del agua (como al extender la mano) y la presión hidrostática. He aquí un principio básico: en un líquido dado en estado estacionario, la presión es la misma a los mismos niveles. Por tanto, la presión es en todas partes la misma en planos horizontales.

Si estás nadando en una piscina y pones la mano un metro por debajo de la superficie en la zona menos profunda, la presión total sobre la mano, que es la suma de la presión atmosférica (una atmósfera) y de la presión hidrostática, será idéntica a la presión sobre la mano de tu amigo, también a un metro de profundidad, en el extremo más hondo de la piscina. Pero si colocas la mano dos metros por debajo de la superficie, experimentará una presión hidrostática el doble de alta. Cuanto más fluido haya por encima de un nivel determinado, mayor será la presión hidrostática a ese nivel.

Por cierto, este mismo principio se aplica a la presión del aire. A veces hablamos de nuestra atmósfera como si se tratase de un océano de aire, al fondo del cual, sobre la mayoría de la superficie terrestre, la presión es de alrededor de una atmósfera. Pero si estuviésemos en la cima de una montaña elevada, habría menos aire por encima, de forma que la presión atmosférica sería menor. En la cumbre del Everest, la presión atmosférica es de solo un tercio de atmósfera.

Si por alguna razón la presión no es la misma en un plano horizontal, el líquido fluirá hasta que la presión en ese plano se iguale. De nuevo, lo mismo sucede con el aire, y el efecto lo conocemos como viento, que está provocado por el movimiento del aire desde una zona de alta presión a otra de presión más baja para igualar las diferencias, y que se detiene cuando las presiones se igualan.

¿Qué sucede con la pajita? Cuando introduces una pajita en un líquido —de momento, con el extremo superior abierto—, el líquido entra en ella hasta que su superficie alcanza el mismo nivel que tiene en el vaso fuera de la pajita. La presión sobre ambas superficies es la misma: una atmósfera.

Supongamos ahora que succiono con la pajita. Sacaré parte del aire, lo que hará que disminuya la presión de la columna de aire sobre el líquido en el interior de la pajita. Si el líquido dentro se quedase donde está, entonces la presión sobre su

superficie sería menor de una atmósfera, porque la presión del aire sobre él ha disminuido. Por tanto, la presión sobre las dos superficies, que están al mismo nivel (en el mismo plano horizontal), dentro y fuera de la pajita, será diferente, lo cual no está permitido. Por tanto, el líquido en el interior de la pajita sube hasta que la presión sobre la capa de líquido que se encuentra al mismo nivel que la superficie exterior vuelve a ser una atmósfera. Si al succionar hago que la presión del aire dentro de la pajita descienda en un 1 por ciento (de 1,00 a 0,99 atmósferas), casi cualquier líquido que nos dé por beber —agua, zumo de arándanos, limonada, cerveza o vino— subirá unos 10 centímetros. ¿Por qué lo sé?

El líquido en la pajita tiene que subir para compensar la disminución en 0,01 atmósferas de la presión sobre él. Además, de la fórmula para calcular la presión hidrostática en un líquido, que no comentaré aquí, sé que una columna de 10 centímetros de agua (o cualquier líquido de densidad comparable) produce una presión hidrostática de 0,01 atmósferas.

Si tu pajita mide 20 centímetros, para que el zumo suba y llegue a tu boca tendrías que succionar con una fuerza suficiente para que la presión disminuyese hasta 0,98 atmósferas. Recuérdalo para luego. Ahora que ya lo sabes todo sobre la ingravidez en el espacio (véase el capítulo 3) y sobre cómo funcionan las pajitas, te propongo un problema muy interesante: una bola de zumo está flotando en el transbordador. No hace falta un vaso ya que el zumo está en ingravidez. Un astronauta introduce con cuidado una pajita en la bola de zumo y empieza a succionar. ¿Podrá beberse el zumo así? Puedes suponer que la presión del aire en el transbordador es de una atmósfera.

Volvamos ahora al caso de la pajita que tapas con el dedo. Si subes la pajita despacio, digamos unos 5 centímetros, mientras siga dentro del zumo, este no se saldrá de la misma. De hecho, seguirá casi en la misma marca donde estaba antes (aunque no del todo). Puedes probar esto haciendo una señal en la pajita a la altura a la que llega el zumo antes de que la levantes. La superficie del zumo dentro de la pajita estará unos 5 centímetros por encima de la superficie del zumo en el vaso.

Pero ¿cómo es esto posible, a la vista de la sagrada afirmación anterior sobre cómo la presión en el líquido se iguala, al mismo nivel, en el interior y en el exterior? ¿No viola esa regla? ¡No! La naturaleza es muy sabia; el volumen del aire que el dedo

atrapa dentro de la pajita aumenta lo justo para que la presión disminuya en la cantidad exacta (unas 0,005 atmósferas) que haga que la presión sea la misma para el líquido en el interior que se encuentra al nivel de la superficie del líquido en el exterior: una atmósfera. Por eso el zumo no subirá exactamente 5 centímetros, sino un poco menos, quizá un milímetro menos, lo justo para dejar un poco de más volumen para que el aire disminuya su presión en la cantidad deseada.

¿Puedes adivinar a qué altura subirá el agua (al nivel del mar) en un tubo cuando has cerrado el extremo superior y lo vas subiendo lentamente? Depende de cuánto aire hubiese atrapado dentro del tubo cuando empezaste a subirlo. Si había muy poco aire, o incluso nada de aire, la altura máxima que podría alcanzar el agua sería de 10,37 metros. Evidentemente, para comprobarlo no te serviría un vaso pequeño, pero sí un cubo de agua. ¿Te sorprende? Lo que hace que sea aún más difícil asumirlo es que la forma del tubo es irrelevante. Puedes retorcerlo e incluso retorcerlo en una espiral y el agua seguirá pudiendo ascender poco más de 10 metros, porque esa es la altura de agua que produce una presión hidrostática de una atmósfera.

Saber que, cuanto menor es la presión atmosférica, menor es la altura máxima posible de la columna de agua nos sirve para poder medir la presión atmosférica. Para verlo, podemos subir a la cima del monte Washington (a unos 1.900 metros de altitud), donde la presión atmosférica, que es la presión en el exterior del tubo, ya no es de una atmósfera, sino de alrededor de 0,82 atmósferas. De forma que si mido la presión en la capa de agua dentro del tubo que se encuentra al nivel de la superficie del agua en el exterior, esta debe ser igualmente de 0,82 atmósferas, lo que implica que la altura máxima de la columna de agua será menor. De hecho, será 0,82 veces los 10,37 metros del nivel del mar, es decir, alrededor de 8,5 metros.

Si hacemos marcas de metros y centímetros en el tubo para marcar la altura de la columna de zumo de arándanos, habremos fabricado un barómetro de zumo de arándanos, que indicará los cambios en la presión del aire. Por cierto, se dice que el científico francés Blaise Pascal construyó un barómetro con vino tinto, algo que cabría esperar de un francés. El hombre al que se atribuye la creación del barómetro a mediados del siglo XVII, el italiano Evangelista Torricelli, que fue

durante un breve período ayudante de Galileo, prefirió fabricarlo con mercurio. La razón es que, para una altura dada de la columna de líquido, cuanto mayor sea su densidad, mayor es la presión hidrostática que produce, y por tanto tiene que subir menos en el tubo. Como el mercurio es unas 13,6 veces más denso que el agua, la longitud del tubo era mucho más razonable. La presión hidrostática de una columna de 10,37 metros de agua (una atmósfera) es la misma que la de 76 centímetros de mercurio (10,37 metros divididos entre 13,6).

En realidad, Torricelli al principio no estaba intentando medir la presión del aire con su aparato, sino que trataba de averiguar si existía algún límite para la altura a la que una bomba de succión podía elevar una columna de agua, un serio problema para la irrigación. Rellenó de mercurio un tubo de cristal de alrededor de un metro de largo, cerrado por el extremo inferior. Selló el extremo superior con el dedo, le dio la vuelta, lo introdujo en un cuenco con mercurio y retiró el dedo. Cuando lo hizo, parte del mercurio salió del tubo hacia el cuenco, pero la columna restante medía unos 76 centímetros de alto. Torricelli explicó que en el espacio en la parte superior del tubo se hizo el vacío, uno de los primeros vacíos producidos en el laboratorio. Sabía que el mercurio era unas 13,6 veces más denso que el agua, así que pudo calcular que la longitud máxima de una columna de agua —que era lo que en realidad le interesaba— sería de unos 10,37 metros. Al obtener estos resultados, se dio cuenta además de que el nivel del líquido variaba con el tiempo y dedujo que estas alteraciones se debían a cambios en la presión atmosférica. Brillante. Además, su experimento explica por qué los barómetros de mercurio siempre tienen un pequeño espacio vacío adicional en la parte superior de sus tubos.

Presión bajo el agua

Al obtener la altura máxima de la columna de agua, Torricelli también calculó algo sobre lo que quizá hayas pensado si alguna vez has buceado para ver peces en el mar. Tengo la corazonada de que probablemente, en algún momento de tu vida, has probado el snorkel. La mayoría de los tubos de snorkel no miden más de 30 centímetros; seguro que alguna vez has querido sumergirte a más profundidad y has deseado que el tubo fuese más largo. ¿Hasta qué profundidad crees que podrías sumergirte y que el tubo siguiera funcionando?, ¿un metro y medio, tres, seis?

Me gusta obtener la respuesta a esta pregunta en clase mediante un sencillo aparato llamado manómetro, una pieza común de laboratorio. Es muy sencillo y es fácil construir uno en casa, como explicaré en un momento. Lo que realmente quiero saber es a qué profundidad puedo llegar y seguir siendo capaz de introducir aire en mis pulmones. Para averiguarlo, tenemos que medir la presión hidrostática del agua sobre mi pecho, que aumenta con la profundidad.

La presión que nos rodea, que es, recordémoslo, idéntica a niveles idénticos, es la suma de la presión atmosférica y la presión hidrostática. Si hago snorkel por debajo de la superficie, inspiro aire del exterior. Ese aire tiene una presión de una atmósfera. Como resultado, cuando inspiro el aire a través del tubo, la presión del aire en mis pulmones pasa a ser también de una atmósfera. Pero la presión sobre mi pecho es la presión atmosférica más la presión hidrostática, así que es mayor que la presión en el interior de mis pulmones; la diferencia es exactamente la presión hidrostática. Esto no es ningún problema al exhalar, pero al inhalar tengo que expandir mi pecho. Y si la presión hidrostática es demasiado alta, porque estoy a demasiada profundidad, simplemente no tengo suficiente fuerza muscular para vencer la diferencia de presión, y no puedo aspirar más aire. Por eso, si quiero descender a mayor profundidad, necesito respirar aire a presión para contrarrestar la presión hidrostática. Pero el aire a alta presión es muy exigente con nuestros cuerpos, motivo por el cual hay límites estrictos para el tiempo de inmersión.

Volvamos al snorkel, ¿hasta qué profundidad puedo llegar? Para averiguarlo, improviso un manómetro en la pared de la sala de conferencias. Imagínate un tubo de plástico transparente de unos cuatro metros de largo. Sujeto un extremo a la pared, en su parte superior izquierda, y después lo retuerzo en forma de U sobre la pared. Cada brazo de la U mide algo menos de dos metros. Vierto en él la cantidad necesaria de zumo de arándanos para cubrir dos metros de tubo, que naturalmente se acaba estabilizando al mismo nivel a ambos lados de la U. Soplando en el extremo derecho del tubo, hago que el zumo de arándanos ascienda por el lado izquierdo de la U. La distancia vertical que consiga al empujar el zumo hacia arriba me indicará a qué profundidad seré capaz de bucear. ¿Por qué? Porque es una medida de la presión que soy capaz de ejercer con mis pulmones para contrarrestar la presión hidrostática del agua (a estos efectos, el agua y el zumo de arándanos

son equivalentes, pero el zumo es más fácil de ver para los alumnos).

Me inclino, vacío mis pulmones, inspiro hasta llenarlos de nuevo, me coloco el extremo derecho del tubo en la boca y soplo con todas mis fuerzas. Se me hunden las mejillas, los ojos se me salen de las órbitas y el zumo remonta por el lado izquierdo del tubo y apenas sube —¿lo habrías adivinado?— 50 centímetros. Me empleo a fondo para conseguir que llegue ahí y no puedo mantenerlo más que unos pocos segundos. He hecho que el zumo subiese unos 50 centímetros en el lado izquierdo, lo que significa que también he conseguido que bajase la misma distancia en el lado derecho; en total, he desplazado la columna de zumo unos 100 centímetros en vertical, un metro. Evidentemente, cuando buceamos estamos aspirando aire, no soplando. Puede que sea más fácil aspirar aire, ¿no? Repito el experimento, pero esta vez succiono el zumo hacia arriba por el tubo hasta donde puedo. El resultado, sin embargo, es aproximadamente el mismo: solo sube unos 50 centímetros por el lado por el que succiono, y por tanto baja la misma distancia por el otro lado. Y acabo completamente exhausto.

Acabo de imitar el snorkel a un metro de profundidad, el equivalente a una décima parte de atmósfera. A mis alumnos, sin excepción, les sorprende la demostración y piensan que pueden hacerlo mejor que su viejo profesor. Así que invito a un chico grande y fuerte a que suba y haga la prueba y, tras dar lo mejor de sí, acaba con la cara completamente colorada y totalmente sorprendido. Solo ha conseguido hacerlo un poco mejor que yo, apenas un par de centímetros.

Resulta que esta es la máxima distancia a la que podemos descender si queremos seguir respirando a través del tubo, un mísero metro. Y, además, solo podemos hacerlo durante unos pocos segundos. Ese es el motivo por el que la mayoría de los tubos son mucho más cortos, normalmente alrededor de 30 centímetros. Prueba a hacerte un tubo más largo con cualquier material a ver qué pasa.

Puede que te preguntes cuánta fuerza se ejerce sobre tu pecho cuando te sumerges para hacer snorkel. A un metro de profundidad, la presión hidrostática asciende a una décima de atmósfera, o una décima de kilogramo por centímetro cuadrado. La superficie de tu pecho es de unos mil centímetros cuadrados. Así que la fuerza sobre tu pecho es de alrededor de 1.100 kilogramos, y la fuerza sobre la pared interior de tu pecho, debida a la presión del aire en tus pulmones, es de unos 1.000

kilogramos. Por lo tanto, una diferencia de presión de una décima parte se traduce en una diferencia de fuerza de 100 kilogramos. Bien mirado, bucear parece mucho más duro, ¿verdad? Si descendieses 10 metros, la presión hidrostática sería de una atmósfera entera, un kilogramo por centímetro cuadrado de superficie, y la fuerza sobre tu pobre pecho sería 1.000 kilos (una tonelada) mayor que la fuerza hacia fuera debida a la presión de una atmósfera en tus pulmones.

Esta es la razón por la que los buscadores de perlas asiáticos, algunos de los cuales descendían con frecuencia a 30 metros, se jugaban la vida a esas profundidades. Como no podían respirar, tenían que contener el aliento, cosa que solo podían hacer durante unos pocos minutos, por lo que tenían que hacer su trabajo rápido.

Ahora puedes valorar el logro de ingeniería que supone un submarino. Pensemos en un submarino a 10 metros de profundidad y supongamos que la presión en el interior es de una atmósfera. La presión hidrostática (que es la diferencia de presión entre el exterior y el interior del submarino) es de unos 10.000 kilogramos por metro cuadrado, unas 10 toneladas por metro cuadrado, así que, como puedes ver, incluso un submarino pequeño ha de ser muy sólido para sumergirse a solo 10 metros.

Esto es lo que hace que sea tan asombroso el logro del señor que inventó el submarino a principios del siglo XVII (Cornelius van Drebbel, que, me alegra decirlo, era holandés). Solo consiguió que funcionase a unos 5 metros de profundidad, pero aun así tuvo que hacer frente a una presión hidrostática de media tonelada ¡y el submarino estaba hecho de cuero y madera! Las historias de la época dicen que consiguió hacer pruebas con una de sus naves a esa profundidad en el río Támesis, en Inglaterra. Se decía que ese modelo estaba propulsado por seis remeros, podía llevar dieciséis pasajeros y era capaz de permanecer sumergido durante varias horas. Los tubos de snorkel se mantenían por encima de la superficie del agua gracias a unos flotadores. El inventor esperaba impresionar al rey Jacobo I y así incitarle a encargar varias de estas naves para su armada, pero por desgracia no impresionó lo suficiente al rey y a sus almirantes, y el submarino nunca llegó a utilizarse en combate. Puede que el submarino de Van Drebbel fuese poco impresionante como arma secreta, pero como hazaña de ingeniería era

absolutamente extraordinaria[12]. La profundidad máxima que pueden alcanzar los submarinos modernos es un secreto militar, pero la opinión más extendida es que pueden alcanzar los 1.000 metros, donde la presión hidrostática es de unas 100 atmósferas, un millón de kilos (1.000 toneladas) por metro cuadrado. No sorprende saber que los submarinos estadounidenses están fabricados con acero de muy alta calidad. Se dice que los submarinos rusos pueden alcanzar profundidades incluso mayores, porque están construidos con titanio más resistente.

Es fácil demostrar lo que le sucedería a un submarino si sus paredes no fuesen lo suficientemente fuertes o si descendiese a una profundidad excesiva. Para hacerlo, conecto una bomba de vacío a una lata de pintura de cinco litros y le voy sacando el aire. La diferencia de presión entre el exterior y el interior solo puede llegar a ser de una atmósfera (¡compárala con la del submarino!). Sabemos que las latas de pintura son bastante resistentes, pero ante nuestros ojos, debido a la diferencia de presión, esta lata se arruga como una endeble lata de refresco. Parece como si un gigante invisible la hubiese cogido y la hubiera aplastado en su puño. Probablemente todos hemos hecho algo parecido alguna vez con una botella de agua de plástico, extrayendo buena parte del aire y haciendo que se arrugue. Intuitivamente, puedes pensar que la botella se espachurra debido a la fuerza con la que la has succionado. Pero la verdadera razón es que cuando extraigo el aire de la lata de pintura, o cuando succionas parte del aire de la botella de agua, la presión en el interior ya no es suficiente para contrarrestar la del aire exterior. Esto es algo que la presión de nuestra propia atmósfera está dispuesta a hacer en cualquier momento. En todo momento.

Una lata metálica de pintura o una botella de agua de plástico son cosas muy corrientes, ¿verdad? Pero si las miramos como físicos, vemos algo completamente diferente: un equilibrio de fuerzas extraordinariamente poderosas. Nuestras vidas no serían posibles sin estos equilibrios de fuerzas, en su mayor parte invisibles, fuerzas debidas a la presión atmosférica e hidrostática y a la inexorable gravedad. Estas fuerzas son tan poderosas que si —o cuando— se desvían del equilibrio, por poco que sea, pueden provocar catástrofes. ¿Te imaginas que se produjese una

[12] Puedes encontrar más información sobre Van Drebbel y los primeros submarinos en www.dutchsubmarines.com/specials/special_ drebbel.htm.

fuga en el fuselaje de un avión a más de 10.000 metros (donde la presión atmosférica es de solo 0,25 atmósferas) cuando el avión vuela a 900 kilómetros por hora? ¿O que se abriese una finísima grieta en el techo del túnel del puerto de Baltimore, a entre 15 y 30 metros bajo la superficie del río Patapsco?

La próxima vez que pasees por tu ciudad, trata de pensar como un físico. ¿Qué ves realmente? Por un lado, ves el resultado de una furiosa batalla que se está librando dentro de cada edificio, y no hablo de las rencillas de oficina. En un lado del campo de batalla, la fuerza de la atracción gravitatoria terrestre que intenta derribarlo todo, no solo las paredes y los suelos y techos, sino las mesas, los conductos del aire acondicionado, los tubos neumáticos para enviar correo, los ascensores, a las secretarias y a los directores generales por igual, incluso el café de la mañana y los cruasanes. Por otro lado, la fuerza combinada del acero, los ladrillos, el cemento y, en última instancia, el propio suelo que elevan el edificio hacia el cielo.

Una forma de ver la arquitectura y la ingeniería de la construcción es, por tanto, como el arte de la guerra para contrarrestar la fuerza hacia abajo. Algunos rascacielos dan la impresión de ser ligeros como plumas y haber escapado a la gravedad. No es así, sino que han trasladado la batalla a nuevas alturas, literalmente. Si te paras a pensarlo, verás que el equilibrio es solo temporal. Los materiales de construcción se corroen, se debilitan y se descomponen, mientras que las fuerzas de nuestro mundo natural son implacables. Solo es cuestión de tiempo.

Donde estos precarios equilibrios pueden resultar más amenazadores es en las grandes ciudades. Recuerda el horrible accidente que tuvo lugar en Nueva York en 2007, cuando una tubería de ochenta y tres años y más de medio metro de ancho de pronto no pudo seguir conteniendo el vapor de alta presión que llevaba. El géiser resultante produjo un agujero de seis metros en Lexington Avenue que engulló un camión grúa y se elevó por encima del cercano edificio Chrysler, de setenta y siete plantas. Si fuerzas tan potencialmente destructivas como estas no permaneciesen en equilibrio casi todo el tiempo, nadie podría pasear por ninguna ciudad.

No todos estos equilibrios entre fuerzas inmensamente poderosas son obra del hombre. Piensa en los árboles. Tranquilos, silenciosos, inmóviles, lentos, resignados, emplean decenas de estrategias biológicas para combatir tanto la fuerza de la gravedad como la presión hidrostática. Qué gran logro el de hacer que broten

ramas nuevas cada año, el de continuar añadiendo anillos a su tronco, haciendo que el árbol sea todavía más resistente aun cuando la atracción gravitatoria entre el árbol y la tierra se hace aún más fuerte. Y, pese a todo, el árbol impulsa la savia hasta sus ramas más altas. ¿No es asombroso que los árboles puedan tener más de 10 metros de altura? Al fin y al cabo, el agua solo podía subir 10 metros en mi pajita, no más. ¿Por qué (y cómo) es capaz el agua de subir mucho más alto en los árboles? Las secuoyas más altas miden más de 100 metros y llevan el agua hasta las hojas de sus copas.

Por eso siento pena cuando veo un gran árbol arrancado por una tormenta. Los vientos feroces, o el hielo y la pesada nieve que se acumulan en sus ramas, han conseguido alterar el delicado equilibrio de fuerzas que el árbol había orquestado. Al pensar en esta batalla sin fin, me sorprendo apreciando aún más el remoto día en que nuestros antepasados se irguieron sobre dos patas en lugar de cuatro y comenzaron a ponerse a la altura de las circunstancias.

Bernoulli y más allá

Puede que no exista hazaña humana más asombrosa que la de desafiar la incesante atracción de la gravedad, dominar los volubles vientos de la presión atmosférica y haber conseguido volar. ¿A qué se debe? Puede que hayas oído que tiene que ver con el principio de Bernoulli y con el aire que fluye por debajo y por encima de las alas. Este principio recibe su nombre del matemático Daniel Bernoulli, que publicó la que ahora conocemos como ecuación de Bernoulli en su libro Hidrodinámica en 1738. Simplificando, el principio afirma que, para flujos de líquido y de gas, cuando aumenta la velocidad del flujo disminuye su presión. Es difícil hacerse una idea de lo que significa, pero puedes verlo en la práctica.

Acércate un folio, una hoja de tamaño estándar 210 mm × 297 mm, a la boca (no dentro de la boca), con su lado más corto junto a ella. El papel se doblará hacia abajo debido a la gravedad. Sopla fuerte justo por encima del papel y mira lo que pasa. Verás que el papel sube. Y, dependiendo de lo fuerte que soples, puedes llegar a hacer que el papel salga disparado hacia arriba. Acabas de demostrar el principio de Bernoulli, y este simple fenómeno explica por qué vuelan los aviones. Aunque muchos nos hemos acostumbrado a ello, ver cómo despega un 747 o estar

dentro sentado cuando se separa del suelo es una experiencia verdaderamente extraña. Basta con ver cómo disfruta un niño cuando ve despegar un avión por primera vez. Un Boeing 747-8 puede levantar en su despegue un peso de unos 500.000 kilos. ¿Cómo es posible que algo así se mantenga en el aire?

El ala de un avión está diseñada para que el aire que pasa por encima se acelere respecto al que fluye por debajo. Por el principio de Bernoulli, el flujo de aire más rápido hace que descienda la presión sobre el ala, y la diferencia de presión resultante respecto a la que existe bajo el ala, más alta, produce una elevación. Llamémosla elevación de Bernoulli. Muchos libros de física afirman que la elevación de Bernoulli es la única responsable del impulso hacia arriba de los aviones (de hecho, esta es una idea muy extendida). Y, sin embargo, si lo piensas un momento te darás cuenta de que no puede ser así. Porque, si fuese verdad, ¿cómo podrían los aviones volar boca abajo?

Así que es obvio que el principio de Bernoulli no puede ser la única razón del impulso hacia arriba. Además de la elevación de Bernoulli existe también lo que se conoce como elevación por reacción. B. C. Johnson lo describe en detalle en su delicioso artículo «Aerodynamic Lift, Bernoulli Effect, Reaction Lift»[13]. La elevación por reacción (cuyo nombre proviene de la tercera ley de Newton: por cada acción existe una reacción igual y opuesta) sucede cuando el aire pasa bajo el ala de un avión orientada hacia arriba. Ese aire, yendo desde la parte anterior del ala a la posterior, es empujado hacia abajo por ella. Esa es la «acción». A la acción debe oponerse una reacción del aire que empuja el ala hacia arriba. En el caso del Boeing 747 (volando a 900 kilómetros por hora a unos 9.000 metros de altura), más del 80 por ciento del impulso hacia arriba se debe a la elevación por reacción y menos del 20 por ciento a la elevación de Bernoulli.

Tú mismo puedes demostrar fácilmente la elevación por reacción la próxima vez que vayas en coche. De hecho, puede que ya lo hayas hecho cuando eras pequeño. Cuando el coche está en movimiento, baja la ventanilla, saca el brazo, mantén la mano en la dirección en que se mueve el coche e inclínala de forma que tus dedos apunten hacia arriba. Sentirás cómo el aire empuja la mano hacia arriba. Voilà! Elevación por reacción.

---

[13] Elevación aerodinámica, efecto de Bernoulli y elevación por reacción; http://mb-soft.com/ public2/lift.html

Quizá pienses que ya entiendes por qué los aviones pueden volar boca abajo. Sin embargo, ¿has caído en la cuenta de que, si el avión gira 180 grados, tanto la fuerza de Bernoulli como la de reacción apuntarán hacia abajo? Recuerda que, en un vuelo normal, la fuerza de reacción es hacia arriba porque las alas están inclinadas hacia arriba. Pero tras un giro de 180 grados estarán inclinadas hacia abajo.

Haz de nuevo el experimento de sentir la elevación por reacción en la mano. Mientras los dedos estén inclinados hacia arriba, sentirás la fuerza hacia arriba. Cambia el ángulo de forma que ahora estén inclinados hacia abajo, y sentirás una fuerza hacia abajo.

¿Cómo es posible entonces volar boca abajo? La única posibilidad es que la elevación provenga de una fuerza de reacción hacia arriba. Esto es posible si el piloto (volando boca abajo) levanta la parte anterior del avión lo suficiente para que las alas vuelvan a estar inclinadas hacia arriba. Es una maniobra complicada solo al alcance de pilotos experimentados. También es bastante peligroso confiar únicamente en la elevación por reacción, ya que por naturaleza no es muy estable. Puedes sentir esta inestabilidad sacando la mano por la ventanilla del coche y viendo cómo tiembla. De hecho, esta dificultad para controlar la elevación por reacción es la causante de que la mayoría de los accidentes de avión tengan lugar cerca del despegue y del aterrizaje. La parte del impulso debida a la elevación por reacción es mayor en el despegue y el aterrizaje que durante el vuelo a altitud normal; por eso, cuando un gran avión de pasajeros aterriza, a veces puedes sentir cómo se bambolea.

El ladrón de bebida

La verdad es que los misterios de la presión no dejan de desconcertarnos. Volvamos, por ejemplo, a la física que se da cuando bebemos con una pajita. He aquí un último enigma digno de consideración, un maravilloso rompecabezas.

Estando en casa un fin de semana me dije: «*Me pregunto cómo sería la pajita más larga con la que podría beber un vaso de zumo*». Todos hemos visto pajitas larguísimas, a menudo con vueltas y revueltas, que les encantan a los niños.

Antes hemos visto que succionando solo podemos desplazar el zumo un máximo de

un metro —y solo durante unos pocos segundos—, lo que significa que no podría sorber zumo con una pajita de más de un metro. Así que decidí cortar un trozo de tubo fino de plástico de un metro y ver si funcionaría. Conseguí sorber el zumo sin problemas. Corté entonces un trozo de 3 metros, me subí a una silla en la cocina, puse un cubo de agua en el suelo y, cómo no, también pude sorberlo. Asombroso. Así que pensé: Si subo al segundo piso de mi casa y veo a alguien abajo, en la terraza, bebiendo un gran vaso de zumo, vino o lo que sea —un enorme vaso de vodka con zumo de arándanos, por ejemplo—, ¿podría robarle la bebida sorbiéndola si tuviese una pajita muy larga? Decidí averiguarlo y esto me llevó a una de las demostraciones que me encanta hacer en clase y que no deja de asombrar a los alumnos.

Saco un largo tubo de plástico transparente enrollado y pido una voluntaria en la primera fila. Coloco un gran vaso de precipitados de cristal con zumo de arándanos —sin vodka— en el suelo de la clase para que lo vean todos los alumnos. Sujetando el tubo, empiezo a subir por una escalera alta, de casi cinco metros.

«Vale, aquí está mi pajita», digo, dejando caer un extremo del tubo hacia la alumna. Coloca el tubo en el vaso y puedo sentir cómo los alumnos están a la expectativa. La clase no consigue creerse que yo esté ahí arriba. Recuerda que vieron cómo solo conseguí desplazar un metro el zumo de arándanos. Ahora estoy a casi cinco metros del suelo. ¿Cómo podría ser capaz de hacerlo?

Empiezo a sorber, resoplando un poco a medida que el zumo va subiendo lentamente por el tubo, primero un metro, luego dos, después tres. Entonces el nivel baja un poco, pero enseguida el zumo vuelve a subir de nuevo muy despacio hasta que llega a mi boca. Lanzo un «Hummmmmm» bien alto y la clase se pone a aplaudir. ¿Qué ha pasado? ¿Por qué he podido sorber el zumo hasta tan arriba?

Para ser sincero, hago trampas. No es que importe, porque el juego no tiene reglas. Cada vez que dejo de sorber, cuando ya no puedo aspirar más aire, pongo la lengua sobre el extremo del tubo. En otras palabras, cierro el tubo y, como hemos visto antes, eso hace que el zumo se quede arriba. Espiro y vuelvo a succionar, y repito el proceso muchas veces. Mi boca se convierte en una especie de bomba de succión y mi lengua hace de válvula.

Para conseguir que el zumo suba esos cinco metros, tengo que hacer que la presión

dentro del tubo baje hasta alrededor de media atmósfera. Y sí, por si te lo estás preguntando, podía haber utilizado el mismo truco con el manómetro y habría sido capaz de hacer que la columna de zumo de arándanos subiese mucho más. ¿Significa eso que también podría haber buceado a mucha mayor profundidad en el lago o en el mar?

¿Tú qué crees? Si sabes la respuesta, ¡mándamela!

Capítulo 5

Encima y debajo, dentro y fuera, del arco iris

Rara vez prestamos atención a muchas de las pequeñas maravillas del mundo —que pueden ser realmente espectaculares— porque no nos han enseñado a verlas. Recuerdo una mañana, hace cuatro o cinco años, en que estaba tomándome un café sentado en mi silla favorita, una Rietveld roja y azul, cuando de pronto vi en la pared un hermoso mosaico de puntos de luz, entre las sombras titilantes que proyectaban las hojas del árbol junto a mi ventana. Estaba tan encantado de haberlos visto que mis ojos se iluminaron. Aunque no estaba segura de lo que había pasado, con su habitual perspicacia, mi mujer, Susan, se preguntó si había algún problema.

«¿Sabes qué es eso? —le respondí, señalando los círculos de luz—. ¿Entiendes lo que está pasando?» Se lo expliqué. Cabría esperar que la luz provocase muchos pequeños centelleos en la pared, en lugar de círculos, ¿verdad? Pero cada uno de los pequeños resquicios entre las hojas estaba actuando como una cámara oscura, una cámara de orificio, y una cámara de ese tipo reproduce la imagen de la fuente de luz, en este caso el Sol. No importa cuál sea la forma de los resquicios a través de los que pasa la luz; mientras sean pequeños lo que se recrea en la pared, su forma es la de la propia fuente de luz.

Así que, durante un eclipse solar parcial, la luz que entrase por mi ventaja ya no formaría círculos en la pared, sino que les faltaría un mordisco, porque esa sería la forma del Sol. ¡Aristóteles ya sabía esto hace más de dos mil años! Fue fantástico ver cómo esos puntos de luz en la pared de mi dormitorio revelaban las extraordinarias propiedades de la luz.

Los secretos del arco iris

Lo cierto es que los maravillosos efectos de la física de la luz se ven por todas partes, en los lugares más corrientes y en algunas de las creaciones más hermosas de la naturaleza. Por ejemplo, en los arcos iris, fenómenos fantásticos y maravillosos. Y están por todas partes. Han fascinado a grandes científicos —Ibn al-Haytham, el científico y matemático musulmán del siglo XI conocido como el padre

de la óptica; el filósofo, matemático y físico francés René Descartes, y el propio sir Isaac Newton—, que han tratado de explicarlos. Y, aun así, la mayoría de los profesores de física ignoran los arcos iris en sus clases. Yo no puedo creerlo; de hecho, creo que es un delito.

No es que la física de los arcos iris sea sencilla. ¿Y qué? ¿Cómo podemos negarnos a abordar algo con tanta influencia sobre nuestra imaginación? ¿Cómo es posible que no queramos entender el misterio tras la belleza intrínseca de estas gloriosas creaciones? Siempre me ha gustado hablar de ellos en clase y les digo a mis alumnos: «Después de esta clase vuestra vida nunca volverá a ser la misma». Lo mismo te digo a ti.

Durante décadas, antiguos alumnos y aficionados que han visto mis clases en la web me han ido mandando por carta o por correo electrónico maravillosas imágenes de arcos iris y otros fenómenos atmosféricos. Siento que tengo una red de buscadores de arcos iris desplegada por todo el mundo. Algunas de las fotos son extraordinarias, en particular las de las cataratas del Niágara, en las que la cantidad de rocío es tal que los arcos iris son espectaculares. Quizá tú también quieras mandarme fotos. ¡No dejes de hacerlo!

Estoy seguro de que en tu vida habrás visto al menos decenas, o incluso centenares, de arcos iris. Si has pasado una temporada en Florida o Hawai, o en otro lugar tropical donde es frecuente que caigan chaparrones mientras brilla el Sol, habrás visto más todavía. Si has regado tu jardín con una manguera o un aspersor mientras brilla el Sol, probablemente los hayas creado tú mismo.

La mayoría de nosotros hemos mirado muchos arcos iris, pero muy pocos los hemos visto. Las mitologías antiguas los llamaban arcos de los dioses, puentes o caminos entre las moradas de los mortales y las de los dioses. En Occidente, el arco iris representaba la promesa de Dios en la Biblia hebrea de nunca volver a provocar inundaciones devastadoras en la Tierra: «Pongo mi arco en las nubes».

Parte del encanto de los arcos iris se debe a que son muy extensos, y se despliegan majestuosos y efímeros de un lado a otro del cielo. Pero, como sucede tantas veces en física, su origen se debe a una cantidad extraordinariamente grande de algo excepcionalmente diminuto: minúsculas esferas de agua, a veces de menos de un milímetro de diámetro, que flotan en el cielo.

Aunque los científicos llevan más de mil años tratando de explicar los orígenes de los arcos iris, fue Isaac Newton quien dio la primera explicación verdaderamente convincente en su obra Opticks, de 1704. Newton entendió varias cosas a la vez, todas ellas fundamentales para que se produzcan los arcos iris. Primero, demostró que la luz blanca normal se compone de todos los colores (iba a decir de «todos los colores del arco iris», pero me habría adelantado). Al refractar (desviar) la luz a través de un prisma de cristal, la separó en sus distintos componentes. Después, al enviar la luz refractada de nuevo a través de otro prisma, combinó la luz de colores de vuelta en luz blanca, probando que no era el prisma el que de alguna forma creaba los colores. También se dio cuenta de que muchos materiales diferentes, entre ellos el agua, podían refractar la luz. Y así es como llegó a comprender que la refracción y reflexión de la luz por las gotas de lluvia eran clave para que se produjese un arco iris.

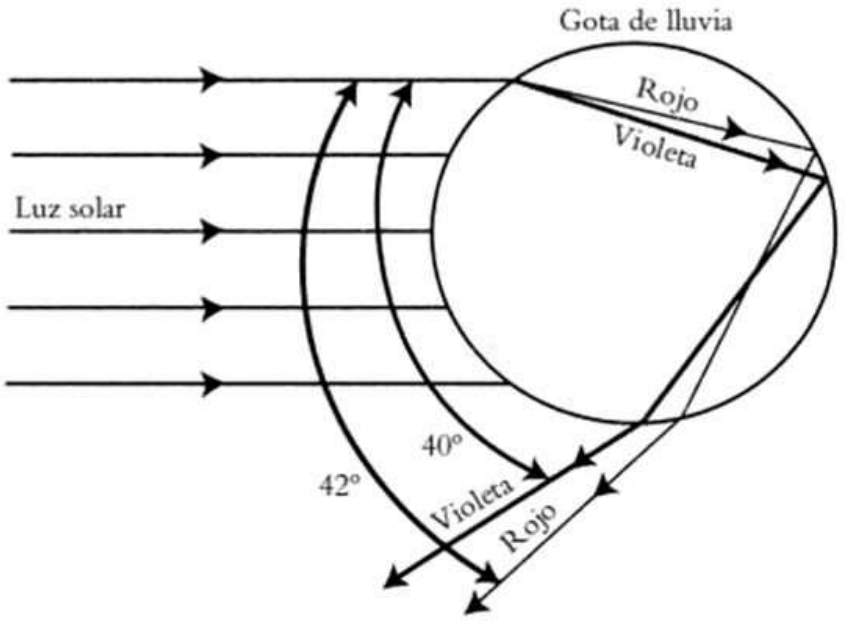
Newton llegó a la correcta conclusión de que un arco iris en el cielo es una colaboración exitosa entre el Sol, una infinidad de gotas de lluvia y tus ojos, que tienen que estar observando esas gotas justo desde los ángulos apropiados. Para entender cómo se produce un arco iris, tenemos que profundizar en qué es lo que sucede cuando la luz penetra en una gota de lluvia. Pero recuerda, todo lo que voy a contar sobre una sola gota de lluvia en realidad se aplica a las innumerables gotas que componen el arco iris.

Para que veas un arco iris, se tienen que cumplir tres condiciones. Primero, el Sol debe estar a tu espalda. Segundo, tiene que haber gotas de lluvia en el cielo delante de ti, ya sea a kilómetros o a unos pocos centenares de metros de distancia. Tercero, la luz debe poder llegar a las gotas de lluvia sin obstáculos, como por ejemplo nubes.

Cuando un rayo de luz penetra en una gota y se refracta, se separa en todos los colores que lo componen. La luz roja es la que menos se refracta (se desvía), mientras que la luz violeta es la que más. Todos estos rayos de distintos colores continúan su camino a través de la gota de lluvia. Parte de la luz sale de la gota, pero otra parte rebota (se refleja), formando un cierto ángulo, hacia la parte anterior de la gota. De hecho, parte de la luz se refleja más de una vez, pero eso solo resulta ser más importante después. De momento, solo nos interesa la luz que

se refleja una sola vez. Cuando la luz sale por la parte anterior de la gota, parte de ella se refracta de nuevo, separándose aún más en los distintos rayos de colores.

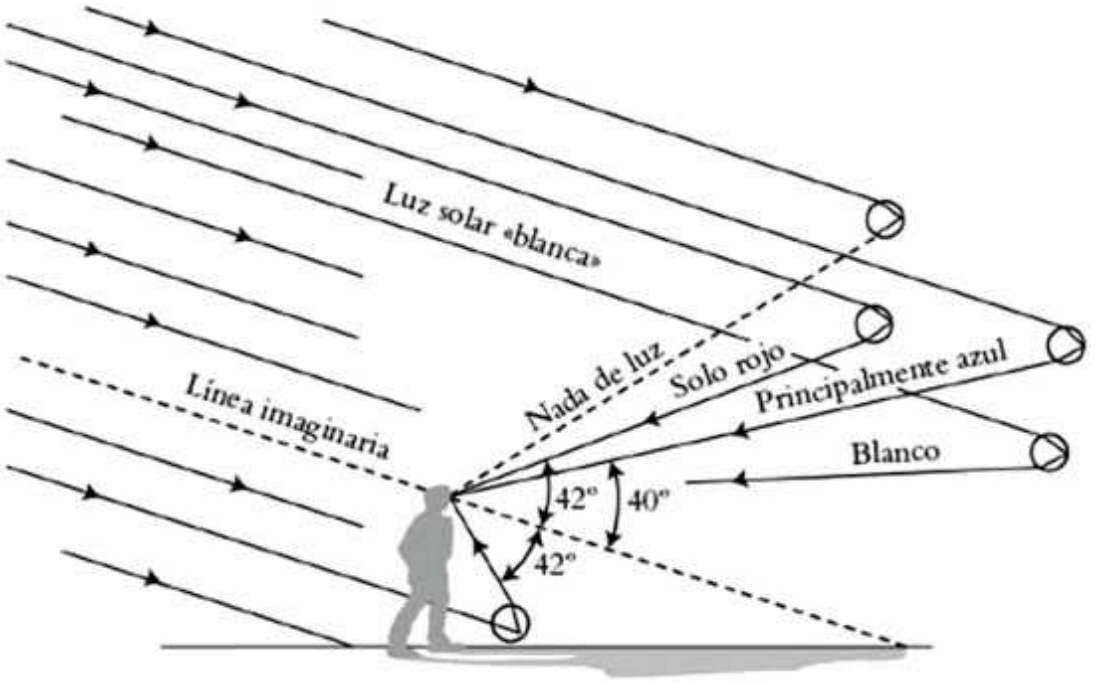
Una vez que estos rayos de luz se refractan, se reflejan y vuelven a refractarse cuando salen de la gota de lluvia, prácticamente llevan la dirección opuesta a la inicial. Para que veamos un arco iris, es muy importante que el ángulo que forma la luz roja al salir de la gota nunca supere los 42 grados respecto a la dirección original de la luz que entra en ella. Y lo mismo sucederá para todas las gotas, porque a efectos prácticos el Sol se encuentra a una distancia infinita. Para la luz violeta, el ángulo máximo es de unos 40 grados. Esta diferencia en los ángulos máximos es la que da lugar a las franjas de colores del arco iris.



Todas las gotas de 42 grados de la «línea imaginaria» serán rojas. Las que estén a 40 grados serán azules. Las gotas que estén a menos de 40 grados serán blancas (como la luz del Sol). No veremos luz proveniente de gotas que estén a ángulos mayores de 42 grados (véase el texto).

Hay una forma fácil de ver un arco iris cuando las condiciones son las apropiadas. Como se ve en la figura siguiente, si trazo una línea que, desde el Sol, pase por mi cabeza y llegue hasta el extremo más lejano de mi sombra en el suelo, esa línea es exactamente paralela a la dirección desde el Sol a las gotas. Cuanto más alto está el

Sol en el cielo, mayor será la inclinación de esta línea y más corta mi sombra. Y al contrario. Llamaremos línea imaginaria a la que va desde el Sol, a través de mi cabeza, hasta su sombra en el suelo.



Esta línea es muy importante, ya que indica hacia dónde hay que mirar en el cielo para ver el arco iris (véase supra).

Si miras a unos 42 grados de distancia de esa línea imaginaria —da igual que sea hacia arriba, a la derecha o a la izquierda—, verás la franja roja del arco iris. A unos 40 grados —hacia arriba, a la derecha o a la izquierda—, verás la franja violeta. En la práctica, es difícil ver el violeta, es mucho más fácil ver el azul, así que de ahora en adelante solo nos referiremos al azul. ¿No son estos los mismos ángulos que he mencionado antes, al hablar de los ángulos máximos de la luz al salir de la gota de lluvia? Sí, y no es casualidad. Vuelve a mirar la figura.

¿Qué pasa con la franja azul del arco iris? Recuerda que su número mágico es de alrededor de 40 grados, dos menos que para la franja roja. Así que se puede ver luz azul que se refracte, refleje y refracte de diferentes gotas a un ángulo máximo de 40 grados. Por tanto, vemos la luz azul a 40 grados de distancia de la línea imaginaria. Como la franja de 40 grados está más cerca de la línea imaginaria que

la de 42 grados, la franja azul siempre estará en el interior de la franja roja del arco iris. Los otros colores que lo componen —naranja, amarillo, verde— se encuentran entre las franjas roja y azul[14].

Puede que te preguntes si, en el ángulo máximo para la luz azul, ¿vemos solo luz azul? Al fin y al cabo, la luz roja también puede salir a 40 grados, que es menos de 42. Si te lo has planteado, enhorabuena; es una muy buena pregunta. La respuesta es que, en la dirección del ángulo máximo para cualquier color, este domina sobre todos los demás. En el caso del rojo, al ser su ángulo el más alto, es el único color.

¿Por qué tiene el arco iris forma de arco y no es una línea recta? Vuelve a la línea imaginaria desde tus ojos a la sombra de tu cabeza y al número mágico de 42 grados. Cuando mides 42 grados de distancia en todas las direcciones, estás trazando un arco de color. Pero ya sabes que no todos los arcos iris trazan arcos completos, que algunos cubren solo pequeñas partes del cielo. Esto sucede cuando no hay gotas suficientes en todas las direcciones o cuando algunas partes del arco iris quedan a la sombra de las nubes.

Hay otro aspecto importante de esta colaboración entre el Sol, las gotas y tus ojos, y una vez que lo veas, entenderás mucho más sobre por qué los arcos iris —tanto los naturales como los artificiales— son como son. Por ejemplo, ¿por qué algunos son enormes, mientras que otros apenas se elevan sobre el horizonte? ¿A qué se debe que a veces los arcos iris se ven donde rompen las olas o en fuentes, en cascadas o en el chorro de la manguera del jardín?

Volvamos a la línea imaginaria que va desde tus ojos a la sombra de tu cabeza. Esta línea empieza en el Sol, a tu espalda, y se extiende hasta el suelo. Pero, mentalmente, puedes extender la línea hasta donde quieras, continuando más allá incluso de la sombra de tu cabeza. Esta línea imaginaria es muy útil, ya que puedes pensar que pasa a través del centro (llamado punto antisolar) de un círculo sobre cuya circunferencia se encuentra el arco iris. Este círculo representa el lugar en el que se formaría el arco iris si no se interpusiese la superficie de la Tierra. La altura del arco iris sobre el horizonte depende de la posición del Sol en el cielo. Cuando el Sol está muy alto, el arco iris apenas se alza sobre el horizonte, mientras que, a

---

[14] Para más información al respecto, puedes echarle un vistazo a mi clase sobre los arcos iris en internet, en http://ocw.mit.edu/courses/physics/803-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video-lectures/lec ture-22/

última hora de la tarde, justo antes de la puesta de Sol, o de madrugada, justo antes de su salida, cuando el Sol está bajo en el cielo y tu sombra es alargada, el arco iris puede ser enorme, llegando a ocupar la mitad del cielo. ¿Por qué la mitad? Porque el ángulo máximo sobre el horizonte al que puede llegar es de 42 grados, cercano a los 45, la mitad de los noventa grados que alcanzaría si estuviese en todo lo alto.

Entonces, ¿se puede ir en busca de arcos iris? En primer lugar, confía en tu instinto sobre cuándo podría formarse un arco iris. La mayoría de nosotros solemos tener una buena intuición al respecto: esas veces en que brilla el Sol justo antes de una tormenta, o cuando sale justo después. O cuando cae un ligero chaparrón y la luz sigue pudiendo llegar a las gotas.

Cuando sientas que está llegando, esto es lo que tienes que hacer. Primero, ponte de espaldas al Sol. Después, localiza la sombra de tu cabeza y mira a unos 42 grados de la línea imaginaria en cualquier dirección. Si hay suficiente luz y suficientes gotas, la colaboración dará resultado y verás un colorido arco iris.

Supón que no puedes ver el Sol en absoluto: aunque brilla claramente, está oculto tras las nubes o los edificios. Mientras no haya nubes entre el Sol y las gotas de lluvia, deberías seguir pudiendo ver el arco iris. Yo puedo ver arcos iris a última hora de la tarde desde el salón de mi casa, que mira hacia el este, aunque no vea el Sol, que está al oeste. De hecho, la mayoría de las veces no necesitas usar el truco de la línea imaginaria y los 42 grados para ver un arco iris, aunque hay una situación en la que puede ser muy importante que te fijes en ambos. Me encanta pasear por las playas de la isla de Plum, en la costa de Massachusetts. Al atardecer, el Sol está al oeste y el océano al este. Si las olas tienen la altura suficiente y producen muchas gotas de agua pequeñas, estas actúan como gotas de lluvia y puedes ver dos pequeños fragmentos del arco iris: uno a unos 42 grados a la izquierda de la línea imaginaria y el otro a unos 42 grados a la derecha. Estos arcos iris duran apenas un instante, así que ayuda mucho saber de antemano dónde tienes que mirar. Como continuamente llegan nuevas olas, si tienes paciencia siempre conseguirás verlo. Ampliaré este tema más adelante en este capítulo.

Hay otra cosa que puedes buscar la próxima vez que veas un arco iris. ¿Recuerdas lo que hemos dicho sobre el ángulo máximo al que cierta luz puede refractarse al

salir de la gota? Aunque verás que la luz que proviene de ciertas gotas es azul, roja o verde, las gotas no pueden ser tan exigentes: también refractan, reflejan y refractan gran cantidad de luz a ángulos menores de 40 grados. Esta luz es una mezcla de todos los colores con intensidades aproximadamente iguales, lo que nosotros vemos como luz blanca. Al mismo tiempo, ninguna parte de la luz que se refracta, se refleja y vuelve a refractarse puede salir de las gotas a un ángulo mayor de 42 grados, por lo que el cielo justo en el exterior del arco iris es más oscuro que dentro de él. Este efecto se ve con más claridad al comparar el brillo del cielo a cada lado del arco iris. Si no te fijas expresamente, es posible que ni te des cuenta[15].

Cuando empecé a explicar el arco iris a mis alumnos, me di cuenta de la riqueza del asunto y de todo lo que me quedaba por aprender. Por ejemplo, sobre los arcos iris dobles, que probablemente hayas visto de vez en cuando. De hecho, casi siempre hay dos arcos iris en el cielo: el llamado arco primario, del que he estado hablando, y el que llamamos arco secundario.

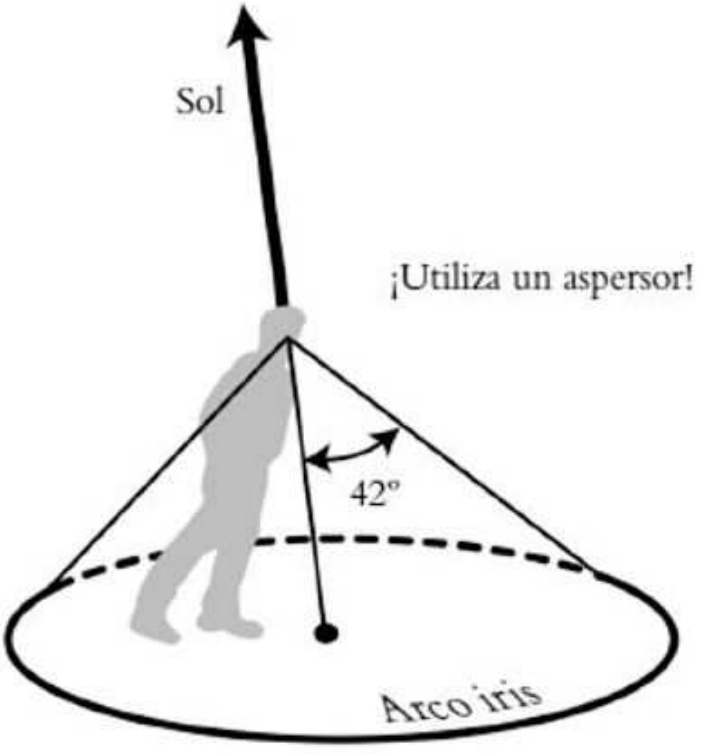
Si has visto algún arco iris doble, probablemente te habrás dado cuenta de que el arco secundario es mucho más tenue que el primario. Sin embargo, de lo que probablemente no te has dado cuenta es que el orden de los colores en el arco secundario es azul por fuera y rojo por dentro, al contrario que en el arco primario. En el cuadernillo de fotografías de este libro hay una excelente fotografía de un arco iris doble.

Para entender el origen del arco secundario, tenemos que volver a nuestra gota de lluvia ideal (recuerda, eso sí, que también hacen falta una infinidad de gotas para formar el arco secundario). Algunos de los rayos que penetran en la gota se reflejan una sola vez; otros lo hacen dos veces antes de salir. Aunque los rayos de luz blanca que entran en una gota pueden reflejarse muchas veces en su interior, el arco primario solo se crea a partir de los que se reflejan una vez. El arco secundario, por su parte, se forma a partir de los que se reflejan dos veces en el interior, antes de refractarse al salir. Este rebote adicional dentro de la gota es lo que hace que en el arco secundario los colores estén invertidos.

---

[15] En el sitio web de Atmospheric Optics (www.atoptics. co.uk) hay fotografías muy buenas de arcos iris en las que puedes ver este efecto.

La razón de que el arco secundario esté en una posición distinta del primario —siempre por fuera— es que los rayos reflejados dos veces salen de la gota a ángulos siempre mayores (sí, mayores) de unos 50 grados, y los rayos azules reflejados dos veces salen a ángulos siempre mayores de unos 53 grados. Por lo tanto, tienes que buscar el arco iris secundario unos diez grados por fuera del primario. El arco secundario es mucho más tenue porque es mucha menos la luz que se refleja dos veces dentro de las gotas que la que lo hace una sola vez, por lo que hay menos luz para crear el arco. Evidentemente, este es el motivo por el que puede ser difícil ver el arco secundario, pero ahora que ya sabes que suelen acompañar a los arcos iris primarios, y dónde buscarlos, confío en que verás muchos más. También te aconsejo que dediques unos minutos al sitio web Atmospheric Optics.



Ahora que sabes cómo se forman los arcos iris, solo te hace falta una manguera para hacer un pequeño truco de magia en tu jardín, o incluso en la acera. Pero, como puedes manipular las gotas y están físicamente próximas a ti, hay un par de diferencias importantes. Por una parte, puedes crear un arco iris aunque el Sol esté

en lo alto del cielo. ¿Por qué? Porque puedes crear gotas entre tú y tu sombra en el suelo, algo que rara vez sucede de forma natural. Siempre que el Sol consiga llegar a las gotas, puede haber arcos iris. Es posible que ya lo hayas hecho antes, pero quizá no tan a propósito.

Si tienes un pulverizador en el extremo de la manguera, ajústalo para que el rocío sea fino, de forma que las gotitas sean muy pequeñas y, cuando el Sol esté en lo alto, apunta con el pulverizador hacia el suelo y empieza a rociar. No podrás ver el círculo entero a la vez, pero sí verás partes del arco iris. Si sigues moviendo el pulverizador en un círculo, irás viendo el arco iris completo por partes. ¿Por qué tienes que hacerlo así? ¡Porque no tienes ojos en la nuca!

Verás el rojo a unos 42 grados de la línea imaginaria, el borde interior del arco circular será azul y dentro del arco verás luz blanca. Me encanta llevar a cabo este pequeño acto de creación mientras riego mi jardín, y me produce especial satisfacción poder dar una vuelta completa y crear un arco iris de 360 grados. (El Sol, por supuesto, no estará siempre a tu espalda; véase supra.)

Un frío día de invierno de 1972 estaba tan empeñado en tomar unas buenas fotos de estos arcos iris caseros para mi clase que hice que mi pobre hija Emma, que tenía solo siete años, sujetase la manguera en mi jardín, lanzando el chorro bien alto, mientras yo disparaba con la cámara. Pero supongo que si eres la hija de un científico tienes que sufrir un poco por el bien de la ciencia. Hice unas cuantas fotos muy buenas; incluso conseguí fotografiar el arco secundario, usando como fondo el asfalto del camino de entrada a la casa.

Espero que intentes este experimento (pero hazlo en verano). Y no te desanimes si no consigues ver el arco secundario, puede que sea demasiado tenue para verse si el fondo no es lo suficientemente oscuro.

A partir de ahora, una vez que ya sabes cómo ver arcos iris, sentirás cada vez con más fuerza la tentación de buscarlos. Yo a menudo no puedo evitar hacerlo. El otro día empezó a llover cuando Susan y yo volvíamos a casa en coche, pero estábamos yendo directamente hacia el oeste, hacia el Sol. Así que paré el coche, aunque había bastante tráfico; me bajé, me di la vuelta y ahí estaba, ¡una verdadera belleza!

Confieso que, cada vez que paso junto a una fuente y hace sol, me coloco de forma que pueda ver el arco iris que sé que habrá allí. Si pasas junto a una fuente en un

día soleado, haz la prueba. Colócate entre el Sol y la fuente, de espaldas al Sol, y recuerda que el rocío de la fuente hace las veces de las gotas de agua suspendidas en el cielo. Busca la sombra de tu cabeza, que determina la línea imaginaria. Mira a 42 grados de esa línea. Si hay gotas suficientes en esa dirección, verás la franja roja del arco iris, e inmediatamente después aparecerá el resto del arco. Es poco habitual ver un arco semicircular completo en una fuente —la única forma de verlo es colocándose muy cerca de ella—, pero el espectáculo es tan hermoso que siempre merece la pena intentarlo.

Una vez que lo hayas encontrado, te advierto que es posible que sientas la necesidad de comunicárselo al resto de los peatones. Yo suelo señalar estos arcos iris de fuente a algún transeúnte, y estoy convencido de que algunos piensan que soy un tío raro. Pero, desde mi punto de vista, ¿por qué habría de ser yo el único en disfrutar de estas maravillas ocultas? Por supuesto que se las muestro a la gente. Si sabes que puede haber un arco iris justo delante de ti, ¿por qué no buscarlo? ¿Por qué no hacer que otros también lo vean? Son tan hermosos.

Los alumnos me preguntan a menudo si hay también un arco terciario. La respuesta es sí y no. El arco terciario resulta, como habrás adivinado, de tres reflexiones dentro de la gota de lluvia. El arco tiene al Sol como centro y, como el arco primario, cuyo centro es el punto antisolar, tiene también un radio de unos 42 grados y es rojo por fuera. Por tanto, para verlo tienes que mirar hacia el Sol y tiene que haber lluvia entre el Sol y tú. Pero, cuando esto sucede, casi nunca verás el Sol. Hay más problemas: gran parte de la luz del Sol atravesará las gotas sin reflejarse y eso produce un resplandor muy grande y brillante alrededor del Sol, lo que hace que en la práctica sea imposible ver el arco terciario. El arco terciario es aún más tenue que el secundario. También es mucho más extenso que los arcos primario y secundario. Así que la luz del arco, ya tenue de por sí, se extiende aún más por el cielo, lo que hace que sea todavía más difícil de ver. Que yo sepa, no existen fotografías de arcos terciarios y no sé de nadie que los haya visto nunca, aunque hay noticias de avistamientos.

Invariablemente, la gente quiere saber si los arcos iris son reales. Se preguntan si son espejismos que se alejan siempre que intentamos acercarnos a ellos. Si no es así, ¿por qué no podemos ver el final del arco iris? Si alguna vez te lo has

planteado, respira tranquilo: los arcos iris son reales, son el resultado de la interacción de la luz del Sol real con gotas de lluvia reales y con tus ojos reales. Pero como surgen de una colaboración precisa entre tus ojos, el Sol y las gotas, tú verás un arco iris diferente que la persona al otro lado de la calle. Igualmente real, pero diferente.

Si no podemos ver normalmente el extremo del arco iris que acaba en la Tierra no es porque no exista, sino porque está demasiado lejos, u oculto por edificios, árboles o montañas, o porque hay menos gotas de agua en el aire en esa zona y el arco es demasiado tenue. Pero si te acercas lo suficiente a un arco iris puedes llegar a tocarlo, algo que deberías ser capaz de hacer con el arco iris que creas con la manguera en tu jardín.

He llegado incluso a sostener un arco iris en la mano mientras me ducho. Lo descubrí un día por casualidad. Cuando miré el chorro de la ducha, de pronto vi dos (¡sí, dos!) brillantes arcos primarios dentro de mi ducha, cada uno de unos treinta centímetros de largo y un par de centímetros de ancho. Fue algo muy emocionante y hermoso, como un sueño. Alargué el brazo y los tuve en mis manos. ¡Qué sensación! Llevaba cuarenta años hablando sobre los arcos iris en mis clases y nunca antes había tenido dos arcos primarios al alcance de la mano.

Esto es lo que sucedió. Un rayo de luz del Sol había entrado en mi ducha a través de la ventana del baño. De alguna manera, era como si en lugar de estar junto a una fuente estuviese en su interior. Como tenía el agua tan cerca, y como mis ojos están a unos cinco centímetros el uno del otro, cada ojo tenía su propia línea imaginaria. Los ángulos eran los precisos, la cantidad de agua era la justa y cada uno de mis ojos vio su propio arco primario. Si cerraba un ojo, uno de los arcos iris desaparecía; si cerraba el otro, desaparecía el otro arco iris. Me habría encantado hacer una foto de ese espectáculo asombroso, pero habría sido imposible, porque mi cámara solo tiene un «ojo».

Haberlos tenido tan cerca ese día hizo que me diera cuenta de lo reales que son los arcos iris. Si movía la cabeza, ellos también se movían, pero si dejaba de moverla se quedaban quietos.

A veces planifico mis duchas matinales para pillar estos arcos iris. El Sol tiene que estar en el sitio apropiado para que entre a través de la ventana del baño en el

ángulo correcto y esto solo sucede entre mediados de mayo y mediados de julio. Probablemente ya sepas que durante ciertos meses el Sol sale más temprano y sube más alto, y que en el hemisferio norte sale más al sur (respecto al este) durante los meses de invierno y más al norte (respecto al este) en verano.

La ventana de mi baño da al sur, pero tiene un edificio enfrente, por lo que la luz nunca puede entrar directamente desde el sur. Así que la luz solo entra aproximadamente desde el sudeste. La primera vez que vi los arcos iris me estaba duchando muy tarde, alrededor de las diez. Para poder ver arcos iris en tu propia ducha, tu baño debe tener una ventana a través de la cual la luz del Sol pueda llegar al chorro. Si desde la ventana de tu baño nunca se puede ver el Sol, no tiene sentido buscar los arcos iris en la ducha, porque no los habrá. La luz debe poder llegar a la ducha. Incluso si entra directamente tampoco es una garantía, porque tiene que haber muchas gotas de agua a 42 grados de tu línea imaginaria, y puede que no sea así.

Quizá sea difícil cumplir con estas condiciones, pero ¿por qué no intentarlo? Si ves que el Sol da sobre tu ducha a última hora de la tarde, siempre puedes plantearte cambiar tus horarios.

Por qué los marineros llevan gafas de sol

Cuando decidas ir en busca de arcos iris, recuerda quitarte las gafas de sol, si son de las que llamamos polarizadas, o puede que te pierdas el espectáculo. Un día tuve una experiencia curiosa con esto. Como ya he contado, me encanta pasear por las playas de la isla de Plum. Y también he explicado cómo se pueden ver pequeños arcos iris en la espuma de las olas. Hace años estaba paseando por la playa; brillaba el Sol y soplaba el viento, y cuando las olas rompían al llegar a la playa formaban mucha espuma, así que vi muchos pequeños fragmentos de arcos, como ya he dicho antes. Empecé a mostrárselos a mi amigo, que me dijo que no veía de qué le hablaba. La situación se repitió varias veces: «Allí hay uno», le gritaba algo molesto. «¡No veo nada!», me respondía gritando. En un momento de inspiración, le pedí que se quitase las gafas de sol; les eché un vistazo y, en efecto, eran polarizadas. Sin las gafas sí que podía ver los arcos iris, ¡e incluso empezó a señalármelos a mí! ¿Qué estaba pasando?

Los arcos iris son en cierto sentido una rareza de la naturaleza, porque casi toda su luz es polarizada. Es probable que te suene el término «polarizado» para describir unas gafas de sol. El término no es del todo correcto técnicamente, pero déjame que te explique qué es la luz polarizada y luego hablaremos de las gafas de sol y los arcos iris.

Las ondas se producen porque algo vibra. Un diapasón o la cuerda de un violín producen al vibrar ondas sonoras, de las que hablaré en el capítulo siguiente. Las ondas de luz se producen por la vibración de los electrones. Cuando todas las vibraciones se producen en una sola dirección, perpendicular a la dirección de propagación de la onda, decimos que las ondas tienen polarización lineal. Para simplificar, no incluiré a partir de ahora el adjetivo «lineal», porque en este capítulo solo hablaré de este tipo de luz polarizada.

Las ondas sonoras nunca pueden ser polarizadas, porque siempre se propagan en la misma dirección en la que oscilan las moléculas de aire en las ondas de presión, como en las ondas que puedes provocar en un *slinky*[16]. La luz, sin embargo, sí puede ser polarizada. La luz del Sol o la de las bombillas de tu casa no lo es, pero es fácil convertir luz no polarizada en polarizada. Una forma de hacerlo es comprando lo que se conoce como gafas de sol polarizadas. Ahora ya sabes por qué su nombre no es del todo correcto: en realidad son gafas de sol polarizantes. Otra manera es comprando un polarizador lineal (inventado por Edwin Land, fundador de la empresa Polaroid) y mirando el mundo a través de él. Los polarizadores de Land suelen tener un milímetro de grosor y los hay de todos los tamaños. Casi toda la luz que pasa a través de ellos (también de las gafas de sol polarizantes) se transforma en polarizada.

Si colocas dos polarizadores rectangulares uno sobre el otro (les reparto dos a cada uno de mis alumnos, para que experimenten en casa) y los giras 90 grados uno respecto al otro, no pasará nada de luz.

La naturaleza produce gran cantidad de luz polarizada sin necesidad de un polarizador de Land. La luz del cielo azul a 90 grados de la dirección del Sol es casi completamente polarizada. ¿Cómo podemos saberlo? Mira al cielo azul (en cualquier

---

[16] Un *slinky* es un juguete que consiste en un muelle en espiral que realiza movimientos curiosos, como bajar escaleras o avanzar por un plano inclinado a partir de un pequeño impulso inicial. *(N. del T.)*

dirección a 90 grados de distancia del Sol) a través de un polarizador lineal y gíralo lentamente. Observarás que cambia la claridad del cielo. Cuando llegue a verse casi totalmente oscuro, la luz de esa parte del cielo estará polarizada casi por completo. Por lo tanto, para reconocer la luz polarizada solo necesitas un polarizador (pero es mucho más divertido tener dos).

En el capítulo 1 he descrito cómo «creo» luz azul en clase produciendo la dispersión de luz blanca con el humo de cigarrillo. Lo dispongo todo de forma que la luz azul que se dispersa en la clase lo haga a un ángulo de unos 90 grados; también está casi totalmente polarizada. Los alumnos pueden verlo con sus propios polarizadores, que siempre traen a las clases.

La luz solar (o la luz de una bombilla) reflejada por el agua o por un cristal también puede volverse completamente polarizada si incide sobre el agua o el cristal formando un determinado ángulo, llamado ángulo de Brewster. Por eso los navegantes y marineros llevan gafas de sol polarizantes: bloquean gran parte de la luz que se refleja en la superficie del agua. (David Brewster fue un físico escocés del siglo XIX que se dedicó principalmente a la investigación en óptica.) Yo siempre llevo al menos un polarizador en la cartera —sí, siempre— y animo a mis alumnos a que hagan lo mismo.

¿Por qué te estoy contando todo esto sobre la luz polarizada? Porque la luz de los arcos iris es casi completamente polarizada. La polarización se produce cuando la luz del Sol se refleja dentro de las gotas de agua, algo que, como ya sabes, es una condición necesaria para que se formen los arcos iris.

En mis clases creo un tipo especial de arco iris (utilizando una sola gota de agua enorme) y consigo demostrar que (1) el rojo está en la parte exterior del arco, (2) el azul está en la parte interior, (3) dentro del arco la luz es blanca y brillante, cosa que no sucede fuera de él, y (4) la luz del arco iris es polarizada. La polarización de los arcos iris me resulta muy fascinante (es una de las razones por las que llevo los polarizadores). Puedes ver esta maravillosa demostración en mi clase en http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video-lectures/lecture-22/.

Más allá del arco iris

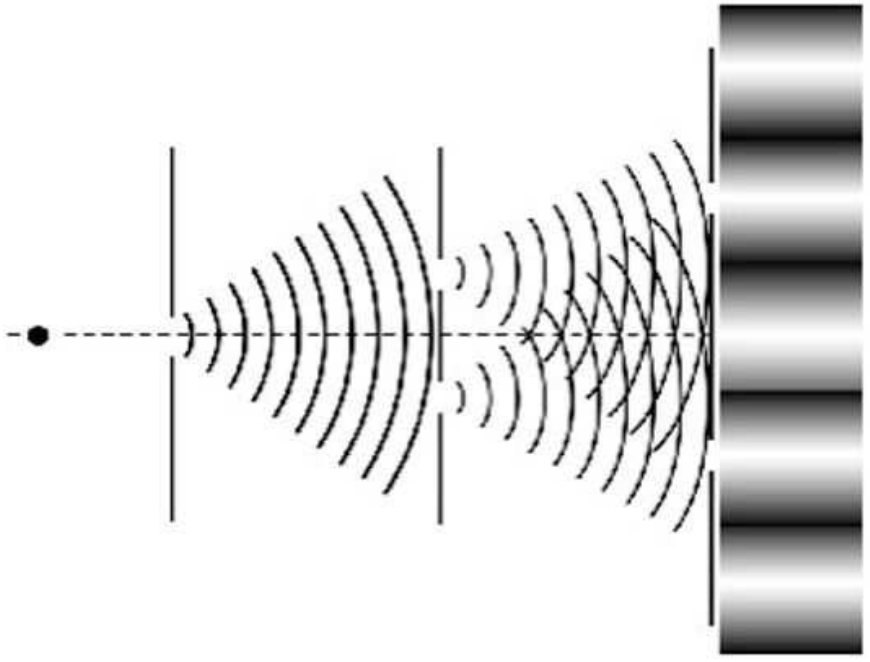
Los arcos iris son las creaciones atmosféricas más conocidas y coloridas, pero no son ni mucho menos las únicas. Existe una gran variedad de fenómenos atmosféricos, algunos de ellos realmente extraños y sorprendentes, y otros profundamente misteriosos. Pero sigamos un poco más con los arcos iris y veamos adónde nos conducen.

Si observas con detenimiento un arco iris muy brillante, a veces verás en su borde interior una sucesión de franjas de colores brillantes y franjas oscuras, los denominados arcos supernumerarios. Puedes ver uno en el cuadernillo de fotografías. Para explicarlos, debemos abandonar la explicación de Newton de los rayos de luz. Él pensaba que la luz está compuesta por partículas, así que cuando se imaginaba cómo los rayos individuales penetraban, rebotaban y salían de las gotas de agua, daba por supuesto que estos rayos se comportaban como si fuesen pequeñas partículas. Pero para explicar los arcos supernumerarios necesitamos ver la luz como formada por ondas. Y para crear un arco supernumerario, las ondas de luz deben atravesar gotas de lluvia muy pequeñas, de menos de un milímetro de diámetro.

Uno de los experimentos más importantes de toda la física (conocido habitualmente como experimento de la doble rendija) demostró que la luz está compuesta de ondas. En este famoso experimento, realizado entre 1801 y 1803, el científico inglés Thomas Young dividió en dos un fino haz de luz solar y observó en una pantalla un patrón (la suma de los dos haces) que solo se podía explicar si la luz estaba formada por ondas. Más adelante, este experimento se realizó de otra forma, utilizando dos rendijas (o dos pequeños agujeros). A partir de aquí, asumiré que un fino haz de luz incide sobre dos agujeros muy pequeños (cercanos entre sí) hechos en un pedazo de cartón fino. La luz atraviesa los agujeros y llega a una pantalla. Si estuviese compuesta de partículas, cada partícula pasaría por uno u otro de los agujeros (no puede pasar por ambos) y se verían dos puntos brillantes en la pantalla. Sin embargo, el patrón que se observa es muy distinto. Se asemeja mucho a lo que cabría esperar si dos ondas hubiesen incidido sobre la pantalla: una onda procedente de uno de los agujeros simultáneamente con otra idéntica proveniente del otro. La suma de dos ondas da lugar a lo que llamamos interferencia. Cuando los picos de las ondas de uno de los agujeros coinciden con los valles de las ondas

del otro, las dos ondas se anulan mutuamente, lo que se denomina interferencia destructiva, y en los lugares en la pantalla donde esto se produce (y hay varios) no se ve luz. ¿No es asombroso? ¡Luz más luz resulta en oscuridad! Por otro lado, en otros lugares de la pantalla donde las dos ondas están en fase, coincidiendo sus respectivos picos y valles, se produce una interferencia constructiva, que resulta en puntos brillantes (hay varios). Por tanto, veremos cómo sobre la pantalla se extiende un patrón en el que se alternan puntos oscuros y brillantes, que es precisamente lo que observó Young con su experimento de división del haz de luz (véase la página siguiente).

En mis clases, lo demuestro utilizando luz láser roja y también con luz láser verde. Es realmente espectacular. Los alumnos ven que el patrón de la luz verde es muy parecido al de la luz roja, salvo porque la separación entre los puntos oscuros y brillantes es algo menor para la luz verde. Esta separación depende del color (y, por tanto, de la longitud de onda) de la luz (retomaré el tema de las longitudes de onda en el capítulo 6).



Los científicos llevan siglos peleándose sobre si la luz está formada por partículas o por ondas, y este experimento llevó a la asombrosa e indiscutible conclusión de que la luz es una onda. Ahora sabemos que la luz puede actuar como una partícula y

como una onda, pero para llegar a esa increíble conclusión habría que esperar otro siglo, con el desarrollo de la mecánica cuántica. De momento no necesitamos profundizar más en ello.

Volviendo a los arcos supernumerarios, la interferencia de las ondas de luz es la que produce las franjas oscuras y brillantes. Este fenómeno es muy marcado cuando el diámetro de las gotas es de unos 0,5 milímetros[17].

Los efectos de la interferencia (normalmente, llamada difracción) quedan aún más patentes cuando los diámetros de las gotitas son menores de unas 40 micras (0,04 milímetros). Cuando esto sucede, los colores se extienden tanto que las ondas de colores diferentes se superponen por completo; los colores se mezclan y el arco iris se vuelve blanco. Los arcos iris blancos con frecuencia exhiben una o dos franjas oscuras (arcos supernumerarios). Son muy poco habituales, yo nunca los he visto. Uno de mis alumnos, Carl Wales, me envió fotografías a mediados de la década de 1970 de varios hermosos arcos iris blancos. Las había tomado en verano, a las dos de la madrugada (sí, dos de la madrugada), desde la isla de hielo de Fletcher, que es un gran iceberg a la deriva (de unos 5 × 11 kilómetros). En aquel entonces, estaba a unos 500 kilómetros del Polo Norte. Puedes ver una bonita fotografía de un arco iris blanco en el cuadernillo.

Estos arcos iris blancos también pueden verse en la niebla, que está formada por gotitas de agua extraordinariamente pequeñas. Los arcos iris de niebla blancos son difíciles de detectar; puede que los hayas visto muchas veces sin darte cuenta. Es habitual que aparezcan cuando la niebla es lo suficientemente fina como para que la luz del Sol la atraviese. Yo los busco bien temprano, cuando el Sol está aún bajo, a la orilla de un río o un puerto, donde la niebla es habitual, y he visto muchos.

A veces puedes incluso crear un arco iris de niebla con los faros del coche. Si baja la niebla por la noche y vas conduciendo, busca un sitio seguro donde aparcar. O, si estás en casa y cae la niebla, pon tu coche mirando hacia ella y enciende los faros. Después aléjate del coche y mira la niebla donde apuntan los haces de luz de los faros. Si tienes suerte, puede que veas un arco iris de niebla. Hacen que la

[17] Puedes ver una imagen de un arco supernumerario en el cuadernillo de fotografías y también en www.atoptics.co.uk/ rainbows/supedrsz.htm.

penumbra de una noche de niebla sea aún más sobrecogedora[18].

El tamaño de las gotitas de agua y la naturaleza ondulatoria de la luz también explican otro de los fenómenos más hermosos que adornan los cielos: las glorias. Cuando mejor se ven es volando sobre las nubes. Créeme, merece la pena buscarlas. Para hacerlo, por supuesto, tienes que estar en un asiento con ventana (que no esté sobre las alas, que bloquean la vista hacia abajo). Tienes que asegurarte de que el Sol está al otro lado del avión, así que tienes que prestar atención a la hora y a la dirección del vuelo. Si puedes ver el Sol desde tu ventanilla, el experimento se ha acabado. (Tengo que pedirte que confíes en mí; una explicación convincente requiere un montón de matemáticas muy complicadas.) Si se cumplen estas condiciones, intenta deducir dónde está el punto antisolar y mira hacia él. Si tienes suerte, puede que veas anillos de colores en las nubes y, si tu avión no vuela a demasiada distancia sobre ellas, puede incluso que veas la gloria alrededor de la sombra del avión (los diámetros de las glorias van desde unos pocos hasta unos 20 grados). Cuanto más pequeñas son las gotas, más grandes son las glorias.

He hecho muchas fotos de glorias, incluyendo algunas en las que la sombra de mi avión se ve claramente y lo más divertido es que la posición de mi asiento está en el centro de la gloria, que es el punto antisolar. Una de estas fotografías está en el cuadernillo.

Puedes encontrar glorias en todo tipo de sitios, no solo desde aviones. Los montañeros las ven a menudo cuando tienen el Sol a sus espaldas y miran hacia valles con niebla. En estos casos, se produce un efecto bastante sobrecogedor. Ven su propia sombra proyectada en la niebla, rodeada por la gloria, a veces con varios anillos de colores, y resulta completamente fantasmagórico. Este fenómeno se conoce asimismo como el espectro de Brocken (también llamado arco de Brocken), por un monte en Alemania donde es habitual que se vean glorias. De hecho, las glorias alrededor de las sombras de las personas se parecen tanto a los halos de los santos, y las propias figuras parecen tan místicas, que no te sorprenderá saber que antiguamente se denominaba gloria a la corona de luz que rodea las cabezas de

[18] En www.extremeinstability.com/08-9-9.htm puedes ver los arcos iris de niebla que un tipo produjo con los faros de su coche. ¿Has visto las franjas oscuras en los arcos blancos?

algunos santos. En China, las glorias se conocen como luz de Buda.

Una vez hice una foto preciosa de mi propia sombra rodeada por una gloria, que llamo la imagen de san Walter. Hace muchos años, mis amigos astrónomos rusos me invitaron a visitar su telescopio de seis metros en las montañas del Cáucaso, que por aquel entonces era el más grande del mundo. Hacía un tiempo malísimo para la observación. Cada día que estuve allí, sobre las cinco y media de la tarde se levantaba desde el valle un muro de niebla que envolvía por completo el telescopio. Del todo. No pudimos hacer ni una observación durante mi visita. En el cuadernillo se puede ver una fotografía de la ascensión de la niebla. Hablando con los astrónomos, me enteré de que era algo muy habitual. Así que pregunté: «Entonces, ¿por qué se construyó el telescopio aquí?». Me dijeron que se construyó en ese lugar porque la mujer de un dirigente del Partido así lo quiso, y punto. Casi me caigo de la silla.

Tras unos días allí, pensé que podría hacer una foto fantástica. El Sol aún brillaba con fuerza en el oeste cada día cuando la niebla subía desde el valle, que estaba al este, la disposición perfecta para las glorias. Así que un día llevé mi cámara al observatorio, y ya me estaba empezando a poner nervioso pensando que la niebla no cooperaría cuando, en efecto, el muro de niebla se levantó mientras el Sol aún brillaba a mi espalda. Esperé y esperé y de pronto, bum, ahí tenía la gloria, alrededor de mi sombra, y disparé. Estaba deseando revelar el carrete —estábamos en la era predigital—, ¡y ahí estaba! Mi sombra es alargada y fantasmal y la sombra de mi cámara aparece rodeada por los anillos de una magnífica gloria. Puedes ver la fotografía en el cuadernillo.

No hace falta irse a un sitio tan exótico para ver un halo alrededor de tu cabeza. Temprano en una mañana soleada, si miras tu sombra sobre un trozo de césped cubierto de rocío (con el Sol a tu espalda, por supuesto), normalmente verás lo que en alemán se llama Heiligenschein, o «luz sagrada»: un resplandor alrededor de la sombra de tu cabeza. (No es de colores; no es una gloria.) Las gotas de rocío sobre el césped reflejan la luz del Sol y crean este efecto. Si lo intentas —te animo a hacerlo—, son más fáciles de encontrar que las glorias. Verás que, como es pronto por la mañana y el Sol está bajo, tu sombra es bastante alargada y pareces uno de esos santos estilizados con halo del arte medieval.

Los diversos tipos de arcos y halos te pueden sorprender en los lugares más inesperados. Mi avistamiento favorito tuvo lugar un día soleado de junio de 2004 —recuerdo que era el solsticio de verano, el 21 de junio— cuando visitaba el Museo de Cordova en Lincoln, Massachusetts, con Susan (que por aquel entonces aún no era mi esposa), mi hijo y su novia. Paseábamos por los jardines hacia la entrada cuando mi hijo me llamó. Ahí, frente a nosotros, en el suelo, había un sensacional arco de colores casi circular. (Como era el solsticio, el Sol estaba lo más alto que llega a elevarse en Boston, a unos setenta grados sobre el horizonte.) ¡Impresionante!

Saqué la cámara e hice unas cuantas fotos tan rápido como pude. Qué inesperado. No había gotitas de agua en el suelo y enseguida me di cuenta de que el arco no podían haberlo producido en ningún caso gotas de agua, porque su radio era mucho menor de 42 grados. Y, sin embargo, era como un arco iris: el rojo en el exterior, el azul en el interior y la luz blanca brillante dentro del arco. ¿Qué podía haberlo generado? Me di cuenta de que tenían que ser partículas esféricas transparentes de algún material, pero ¿de qué?

Una de mis fotografías del arco, que puedes ver en el cuadernillo, salió tan bien que se convirtió en la fotografía del misterio astronómico del día para la NASA[19], publicada en la web el 13 de septiembre de 2004[20]. Recibí unos tres mil mensajes con conjeturas sobre lo que podía ser. Mi respuesta favorita fue una nota escrita a mano por Benjamin Geisler, de cuatro años, que decía: «Creo que tu misteriosa foto está hecha con luz, ceras, subrayadores y lápices de colores». La tengo puesta en el tablón de anuncios junto a mi oficina en el MIT. De todas las respuestas, unas treinta iban bien encaminadas, aunque solo cinco acertaron de pleno.

La mejor pista para este acertijo es que el museo estaba en obras cuando lo visitamos. En concreto, se habían alisado las paredes del museo usando un chorro de arena. Markos Hankin, que se encargaba de las demostraciones de física en el MIT y con quien he trabajado durante muchos años, me dijo —yo entonces no lo sabía— que algunos de estos chorros utilizan cuentas de cristal. En efecto, había muchas pequeñas cuentas de cristal por el suelo; me llevé unos cuantos puñados. Lo que habíamos visto era un arco de cristal, que ahora se ha convertido en una

---

[19] Por cierto, este es un sitio web estupendo que deberías visitar a diario: http://apod.nasa.gov/apod/astropix.html.

[20] Si quieres ver mi foto en internet, pincha en el archivo del sitio web y ve al 13 de septiembre de 2004. Véase *supra* el texto para la URL general.

categoría oficial de arco, producido por cuentas de cristal; tiene un radio de unos 28 grados, aunque su valor exacto depende del tipo de cristal.

Markos y yo estábamos deseando ver si podíamos crear uno de estos arcos para mis clases. Compramos varios kilos de cuentas de cristal, las pegamos en grandes hojas de papel negro y las colgamos de una pizarra en la sala de conferencias. ¡Funcionó! Pedí a los alumnos que se fuesen acercando, de uno en uno, a la parte delantera de la clase, donde se colocaban frente a la pizarra y proyectaban su sombra en pleno centro de su propio arco de cristal.

Fue una experiencia tan emocionante para los alumnos que quizá quieras intentarlo en casa; crear un arco de cristal no es tan difícil. Depende de cuáles sean tus objetivos. Si solo quieres ver los colores del arco, es bastante fácil. Ver un arco completo que rodee tu cabeza requiere más trabajo.

Para ver un pequeño fragmento del arco, todo lo que necesitas es un cuadrado de cartón negro de unos 30 centímetros de lado, un poco de espray adhesivo transparente (nosotros utilizamos Spray Mount Artist's Adhesive, de 3M, pero sirve cualquier pegamento transparente en espray) y cuentas esféricas transparentes de cristal. Tienen que ser transparentes y esféricas[21].

Rocía el cartón con el pegamento y después espolvorea las cuentas sobre él. La distancia media entre ellas no es fundamental, pero cuanto más cerca estén mejor. Ten cuidado con las cuentas, quizá prefieras hacerlo en el exterior, para que no se te caigan por el suelo. Deja que se seque el pegamento y, si hace sol, sal fuera.

Traza la línea imaginaria (desde tu cabeza hasta su sombra). Coloca el cartón en algún lugar de esa línea, de forma que puedas ver en él la sombra de tu cabeza (si el Sol está bajo, puedes colocar el cartón en una silla; si está alto, lo puedes poner en el suelo, donde, como recordarás, estaban las cuentas de cristal del Museo de Cordova). Puedes elegir la distancia a la que colocas el cartón. Supongamos que lo colocas a 1,2 metros. Aléjalo entonces unos 0,6 metros de la línea imaginaria, en cualquier dirección (izquierda, derecha, arriba, abajo) y verás los colores del arco de cristal. Si prefieres poner el cartón más lejos, pongamos que a 1,5 metros, entonces tendrás que desplazarlo 0,75 metros para ver los colores del arco. Quizá te

[21] Nosotros utilizamos «cuentas de cristal gruesas para granallado», con diámetros de entre 150 y 250 micras, que puedes encontrar en http://tinyurl.com/glassbeads 4rainbow.

preguntes de dónde salen esos números. La respuesta es sencilla: el radio de un arco de cristal es de unos 28 grados.

Cuando veas los colores, puedes mover el cartón en un círculo alrededor de la línea imaginaria para buscar las otras partes del arco. Al hacerlo, estás trazando el arco circular completo en porciones, como hiciste con la manguera en el jardín.

Si quieres ver el arco completo alrededor de tu sombra a la vez, necesitarás un trozo de cartón más grande —valdrá con un metro cuadrado— y con muchas más cuentas. Sitúa la sombra de tu cabeza cerca del centro del cartón. Si lo pones a unos 80 centímetros, inmediatamente verás el arco de cristal entero. Si lo colocas demasiado lejos, pongamos que a 1,2 metros, no podrás ver el arco entero. Tú decides; ¡pásalo bien!

Si no hace sol, puedes intentar el experimento dentro de casa, como yo hice en mis clases, apuntando con una luz muy fuerte —como un foco— sobre una pared, donde habrás pegado o colgado el cartón. Colócate de forma que tengas la luz detrás y la sombra de tu cabeza esté en el centro del cartón de un metro cuadrado. Si te sitúas a 80 centímetros del cartón, deberías poder ver el arco completo alrededor de tu sombra. ¡Ahí tienes el arco de cristal!

Evidentemente, no necesitamos entender cómo se forma un arco iris, un arco de niebla o un arco de cristal para apreciar su belleza, pero entender la física de los arcos iris nos permite admirarlos con otros ojos (yo lo llamo la belleza del conocimiento). Estamos más atentos a las pequeñas maravillas que podemos encontrar en una mañana de niebla, o en la ducha, o cuando pasamos junto a una fuente, o al mirar por la ventana del avión mientras todos los demás ven una película. Espero que te descubras poniéndote de espaldas al Sol la próxima vez que sientas que se acerca un arco iris, mirando a 42 grados de la línea imaginaria y encontrando el aro rojo superior de un glorioso arco iris que atraviesa el cielo.

Hago esta predicción: la próxima vez que veas un arco iris, comprobarás que es rojo por fuera y azul por dentro; tratarás de encontrar el arco secundario y confirmarás que los colores están invertidos; verás que el cielo es más claro dentro del arco primario y mucho más oscuro fuera; y si llevas encima un polarizador lineal (cosa que deberías hacer siempre), confirmarás que ambos arcos están muy polarizados. No podrás resistirlo. Es una enfermedad que te perseguirá durante el

resto de tu vida. Es culpa mía, pero yo no podré curarte, y ni siquiera me siento mal por ello, ¡en absoluto!

Capítulo 6

Armonías de cuerdas y vientos

Cuando tenía diez años asistí a clases de violín, pero era un desastre y lo dejé al cabo de un año. A los veintitantos tomé clases de piano y volví a fracasar. Sigo sin entender cómo la gente es capaz de leer notas y convertirlas en música usando los diez dedos de las dos manos. Sin embargo, me gusta mucho la música y, además de la conexión emocional con ella, he llegado a entenderla a través de la física. De hecho, me encanta la física de la música, que empieza, cómo no, con la física del sonido.

Probablemente sabrás que el sonido comienza con una o más vibraciones muy rápidas de un objeto, como la superficie de un tambor, un diapasón o la cuerda de un violín. Estas vibraciones son bastante evidentes, ¿verdad? Sin embargo, lo que está pasando realmente cuando estos objetos vibran no es tan obvio, porque suele ser invisible.

El movimiento de ida y vuelta de un diapasón comprime el aire que hay junto a él. Después, cuando se mueve en la otra dirección, descomprime el aire adyacente. Este sucesivo tira y afloja crea una onda en el aire, una onda de presión, que llamamos onda sonora. Esta onda llega a nuestros oídos muy rápido, a la conocida como velocidad del sonido: unos 340 metros por segundo (alrededor de un kilómetro en tres segundos). Esta es la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente. Puede variar mucho en función del medio por el que viaja. Es cuatro veces mayor en el agua que en el aire, y quince veces mayor en el hierro.

La velocidad de la luz (y de toda radiación electromagnética) en el vacío es una constante famosa, conocida como c, unos 300.000 kilómetros por segundo, pero la velocidad de la luz visible es aproximadamente un tercio más lenta en el agua.

Volvamos ahora al diapasón. Cuando la onda que produce llega a nuestros oídos, agita nuestros tímpanos hacia dentro y hacia fuera al mismo ritmo exactamente al que las oscilaciones del diapasón sacuden el aire. Entonces, mediante un proceso extremadamente complicado, el tímpano hace que vibren los huesos del oído medio (con nombres fantásticos como martillo, yunque y estribo), y estos a su vez producen ondas en el fluido del oído interno. Estas ondas se convierten a

continuación en impulsos eléctricos nerviosos que se envían al cerebro, que interpreta estas señales como sonido. Menudo proceso.

Las ondas sonoras —de hecho, todas las ondas— tienen tres características fundamentales: frecuencia, longitud de onda y amplitud. La frecuencia es el número de ondas que pasan por un punto determinado en un período de tiempo dado. Si miras las olas del mar desde un barco o un crucero, quizá veas cómo, pongamos, diez olas pasan en un minuto, con lo que diríamos que tienen una frecuencia de diez por minuto. Pero en la práctica normalmente la frecuencia se mide en oscilaciones por segundo, también llamadas hercios, o Hz (200 oscilaciones por segundo son 200 hercios).

La longitud de onda, por su parte, es la distancia entre dos picos (o entre dos valles) de la onda. Una de las características fundamentales de las ondas es que cuanto mayor es su frecuencia, menor es su longitud de onda, y viceversa. Llegamos aquí a un conjunto de relaciones extraordinariamente importantes en la física entre la velocidad, la frecuencia y la longitud de onda, válidas tanto para ondas electromagnéticas (rayos X, luz visible, infrarrojos y ondas de radio) como para ondas sonoras en una bañera o para las olas del mar. Por ejemplo, la longitud de onda en el aire de un tono de 440 hercios (el *la* central en el piano) es 340 dividido entre 440, es decir, 0,77 metros.

Si te paras a pensarlo, verás que tiene mucho sentido. Como la velocidad del sonido en un medio determinado es constante (excepto en los gases, donde depende de la temperatura), cuantas más ondas sonoras haya en un determinado período de tiempo, más cortas habrán de ser para que quepan en ese período. Y lo contrario también es obviamente cierto: cuantas menos ondas haya en el mismo intervalo de tiempo, más larga tendrá que ser cada una de ellas. En cuanto a la longitud de onda, las magnitudes varían para los diferentes tipos de ondas. Por ejemplo, aunque las longitudes de onda del sonido se miden en metros, las de la luz se miden en nanómetros (un nanómetro es una milmillonésima de un metro).

¿Y qué hay de la amplitud? Piensa de nuevo en las olas del mar vistas desde un barco. Verás que algunas de las olas son más altas que otras, aunque puede que tengan la misma longitud de onda. Esta característica de la onda es lo que se conoce como amplitud. La amplitud de una onda sonora determina cuán fuerte o

débil es el sonido: cuanto mayor es su amplitud, más fuerte es el sonido, y viceversa. Esto se debe a que cuanto mayor es su amplitud, mayor es la energía que lleva una onda. Como cualquier surfista te podría decir, cuanto más alta es una ola más energía transporta. Cuando rasgueas las cuerdas de una guitarra con más fuerza, les transmites más energía y produces un sonido más fuerte. La amplitud de las olas del mar se mide en metros y centímetros. La amplitud de una onda sonora en el aire es la distancia en que las moléculas se mueven hacia delante y atrás en la onda de presión, pero nunca se expresa así, sino que en su lugar se mide la intensidad del sonido, que se expresa en decibelios. La escala de los decibelios es bastante complicada. Por suerte, no necesitas saber nada sobre ella.

El tono de un sonido, su altura dentro de la escala musical, depende, por su parte, de la frecuencia. Cuanto más alta es la frecuencia, más alto es el tono, y viceversa. Cuando tocamos música, cambiamos la frecuencia (y, por tanto, el tono) continuamente.

El oído humano es capaz de oír un rango enorme de frecuencias, desde unos 20 hercios (la nota más baja del piano es 27,5 hercios) hasta unos 20.000 hercios. En mis clases hago una gran demostración, en la que utilizo una máquina que produce sonidos, un audiómetro, que puede emitir distintas frecuencias a distintas intensidades. Les pido a los alumnos que levanten las manos mientras sigan oyendo el sonido y aumento gradualmente la frecuencia. Cuando nos hacemos mayores, la mayoría perdemos la capacidad de oír frecuencias altas. Mi frecuencia de corte es de cerca de 4.000 hercios, cuatro octavas por encima del do central, en el extremo del teclado del piano. Sigo subiendo la frecuencia, hasta 10.000 y luego 15.000 hercios, y algunos empiezan a bajar las manos. A 20.000 hercios, solo la mitad de las manos siguen en alto. Después voy más despacio: 21.000, 22.000, 23.000. Cuando llego a 24.000, normalmente solo quedan unas pocas manos levantadas. En ese momento, les gasto una pequeña broma. Apago la máquina pero hago como si subiese la frecuencia aún más, hasta 27.000 hercios. Uno o dos valientes afirman que oyen estas notas superaltas, hasta que les pincho el globo con delicadeza. Todos nos reímos.

Piensa en cómo funciona un diapasón. Si lo golpeas con más fuerza, el número de vibraciones por segundo de sus dientes sigue siendo el mismo, por lo que la

frecuencia del sonido que produce no cambia. Por eso siempre da la misma nota. Sin embargo, la amplitud de la oscilación de sus dientes sí que aumenta cuando lo golpeas con más fuerza. Podrías verlo si grabases el diapasón cuando lo golpeas y después lo reprodujeses a cámara lenta. Verías que los dientes del diapasón se mueven de un lado a otro, y se desplazarían más cuanta mayor fuese la fuerza con la que los golpeas. Como aumenta la amplitud, la nota que se produce será más fuerte, pero como los dientes siguen oscilando a la misma frecuencia, la nota sería la misma. ¿No es raro? Si lo piensas un poco, verás que es exactamente como el péndulo (véase el capítulo 3), cuyo período (el tiempo que tarda en dar una oscilación completa) es independiente de la amplitud de sus balanceos.

¿Ondas sonoras en el espacio?

¿Siguen siendo válidas estas relaciones entre las magnitudes del sonido fuera de la Tierra? ¿Has oído alguna vez decir que en el espacio no hay sonido? Eso significaría que, por muy fuerte que tocases un piano en la superficie de la Luna, no produciría ningún sonido. ¿Es eso posible? Sí, la Luna no tiene atmósfera, lo que hay es básicamente un vacío. Así que podrías deducir, quizá con tristeza, que sí, que incluso las explosiones de estrellas y los choques de galaxias más espectaculares se producen en el silencio más absoluto. Podríamos suponer incluso que el propio big bang, la explosión primigenia que creó nuestro universo hace casi catorce mil millones de años, tuvo lugar completamente en silencio. Pero espera un momento. El espacio, como muchas otras cosas en la vida, es mucho más enrevesado y complicado de lo que pensábamos hace apenas unas décadas.

Aunque cualquiera de nosotros moriríamos rápidamente por falta de oxígeno si intentásemos respirar en el espacio, lo cierto es que el espacio exterior, incluso el espacio profundo, no es un vacío perfecto. Todos estos términos son relativos. Los espacios interestelar e intergaláctico se acercan millones de veces más al vacío que el mejor vacío que podemos crear en la Tierra. Aun así, lo cierto es que la materia que flota por el espacio tiene características importantes y reconocibles.

La mayor parte de esta materia es lo que se llama plasma: gases ionizados —compuestos parcial o completamente por partículas cargadas, como núcleos de hidrógeno (protones) y electrones— de densidad altamente variable. El plasma está

presente en nuestro sistema solar, donde solemos llamarlo viento solar, y fluye a chorros desde el Sol (es el fenómeno a cuyo conocimiento tanto contribuyó Bruno Rossi). También se encuentran plasmas en las estrellas y en las galaxias, entre las estrellas (donde a veces se conoce como medio interestelar), e incluso entre las galaxias (donde se denomina medio intergaláctico). La mayoría de los astrofísicos creen que más del 99,9 por ciento de toda la materia observable es plasma.

Párate a pensarlo. En cualquier lugar donde existe materia pueden producirse y propagarse ondas de presión (y, por tanto, sonido). Y como hay plasma en todos los lugares del espacio (incluido nuestro sistema solar), hay muchas ondas sonoras por ahí fuera, aunque no podamos oírlas. Nuestros limitados oídos pueden oír un rango de frecuencias bastante amplio —de más de tres órdenes de magnitud, de hecho—, pero no estamos dotados para escuchar la música de las esferas celestiales.

Permíteme ponerte un ejemplo. En 2003, los físicos descubrieron ondulaciones en el gas supercaliente (plasma) que rodea un agujero negro supermasivo en el centro de una galaxia en el cúmulo de galaxias Perseo, un gran grupo de miles de galaxias a unos 250 millones de años luz de la Tierra. Estas ondulaciones eran claros indicios de la existencia de ondas sonoras, provocadas por la emisión de grandes cantidades de energía cuando el agujero negro engullía materia. (Trataré los agujeros negros con más detalle en el capítulo 12.) Los físicos calcularon que la frecuencia de las ondas era la de un si bemol, ¡pero tan grave que está 57 octavas (un factor aproximado de 10^{17}) por debajo del do central, cuya frecuencia es de unos 262 hercios![22]

Volvamos ahora al big bang. Si la explosión primigenia que dio origen a nuestro universo creó ondas de presión en la materia originaria —la materia que más tarde se expandió y se enfrió, dando lugar a las galaxias, las estrellas y, por último, los planetas—, deberían poderse detectar los vestigios de esas ondas sonoras. Los físicos han calculado a qué distancia deberían haber estado las ondulaciones en el plasma primigenio (unos 500.000 años luz) y a qué distancia deberían estar hoy, tras la expansión del universo durante más de 13.000 millones de años. El resultado al que llegaron era de unos 500 millones de años luz.

---

[22] Puedes ver estas ondulaciones cósmicas en http://science.nasa.gov/science-news/ science-at-nasa/2003/09sep_blackholesounds/

Actualmente se están llevando a cabo dos ambiciosos proyectos para crear mapas de las galaxias: el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) en Nuevo México y el Two-degree Field (2dF) Galaxy Redshift Survey en Australia. Ambos buscan estas ondulaciones en la distribución de galaxias y de forma independiente han descubierto… ¿lo adivinas? Han descubierto que «en la actualidad es ligeramente más probable encontrar galaxias a 500 millones de años luz entre sí que a cualquier otra distancia». Por tanto, el big bang produjo un sonido grave de gong que ahora tiene una longitud de onda de unos 500 millones de años luz, una frecuencia unas cincuenta octavas (un factor de 1015) por debajo de nuestro umbral de audición[23].
En ese sitio puedes ver y oír cómo simultáneamente ha comprimido el tiempo (convirtiendo 100 millones de años en 10 segundos) y ha elevado el tono del universo originario cincuenta octavas, para que puedas escuchar la «música» que produjo el big bang.

Las maravillas de la resonancia

El fenómeno que llamamos resonancia hace posibles muchas cosas que o bien no existirían en absoluto, o bien serían mucho menos interesantes sin él: no solo la música, sino las radios, los relojes, los trampolines, los columpios, los ordenadores, los silbatos de los trenes, las campanas de las iglesias y la imagen por resonancia magnética (IRM) que quizá te hayan tomado de la rodilla o del hombro (¿sabías que la «R» viene de «resonancia»?).
¿Qué es exactamente la resonancia? Puedes hacerte una idea si piensas en un niño al que empujas en un columpio. Sabes intuitivamente que puedes conseguir balanceos de una gran amplitud con muy poco esfuerzo. Como el columpio, que es un péndulo, tiene una frecuencia claramente definida (véase el capítulo 3), si sincronizas con precisión tus impulsos con esa frecuencia, pequeños impulsos adicionales tendrán un impacto acumulativo grande en la altura que alcance el columpio. Puedes empujar a tu hijo cada vez más alto con ligeros toques con un par de dedos.
Cuando lo haces, estás sacando partido de la resonancia. Resonancia, en física, es

---

[23] . El astrónomo Mark Whittle ha jugueteado bastante con lo que llama acústica del big bang, y tú también puedes hacerlo entrando en su http://www.astro.virginia.edu/~dmw8f/ BBA_web/index_frames.html

la tendencia de algo —ya sea un péndulo, un diapasón, una cuerda de violín, una copa de vino, la piel de un tambor, una viga de acero, un átomo, un electrón, un núcleo o incluso una columna de aire— a vibrar con más intensidad a determinadas frecuencias (de resonancia o naturales) que a otras.

Un diapasón, por ejemplo, se fabrica para que siempre vibre a su frecuencia de resonancia. Si es de 440 hercios, produce la nota conocida como la de concierto, el *la* por encima del do central en el piano. Independientemente de cómo lo hagas vibrar, sus dientes oscilarán, se moverán de un lado a otro, 440 veces por segundo.

Todos los materiales tienen frecuencias de resonancia y, si comunicas energía a un sistema o a un objeto, es posible que empiece a vibrar a esas frecuencias, para las que se obtiene un efecto muy importante con un aporte de energía relativamente pequeño. Cuando das golpecitos a una delicada copa de vino vacía con una cuchara, por ejemplo, o rozas su borde con un dedo húmedo, sonará con un tono particular su frecuencia de resonancia. La resonancia no sale gratis, aunque a veces lo parezca. Pero a las frecuencias de resonancia los objetos hacen el uso más eficiente de la energía que se les suministra.

Una comba sigue el mismo principio. Si alguna vez has tenido en las manos un extremo de la comba, sabrás que es necesario un tiempo determinado para que la cuerda dé vueltas formando un buen arco, y aunque puede que hayas hecho círculos con la mano para conseguirlo, lo importante son los movimientos verticales u horizontales con los que haces que la cuerda oscile. En un momento dado, la cuerda comienza a dar vueltas alegremente con un bonito arco; apenas tienes que mover la mano para que siga así y tus amigos pueden empezar a saltar en mitad del arco, sincronizando intuitivamente sus saltos con la frecuencia de resonancia de la cuerda.

Puede que no lo supieses cuando jugabas en el patio, pero para que funcione basta con que una de las personas mueva la mano, la otra puede simplemente sostener el otro extremo. Lo importante es que entre los dos habéis llegado a la frecuencia de resonancia más baja de la cuerda, también llamada frecuencia fundamental. Si no fuese por esto, el juego que conocemos como cuerdas cruzadas, en el que dos personas hacen girar dos cuerdas en direcciones opuestas sería prácticamente imposible. Lo que hace posible que dos cuerdas, sostenidas por las mismas

personas, vayan en direcciones opuestas es que se necesita muy poca energía para que cada una de ellas siga moviéndose. Como son tus manos las que imprimen la fuerza, la cuerda se convierte en lo que se conoce como un oscilador forzado. Sabes por intuición que, una vez que alcanzas la frecuencia de resonancia de la cuerda, te interesa mantenerla, así que ya no aceleras más la mano.

Si lo hicieses, el bonito arco rotatorio se descompondría en una cuerda enredada y el saltador enseguida se enfadaría. Pero si tuvieses una cuerda lo suficientemente larga y pudieses mover tu extremo lo suficientemente rápido, pronto verías que la cuerda crearía dos arcos, uno de los cuales bajaría mientras el otro subiría, y que el punto medio de la cuerda permanecería estacionario. A ese punto medio se le llama nodo. Entonces podrían saltar dos amigos, uno en cada arco. Quizá lo hayas visto en el circo. ¿Qué ha pasado? Has llegado a una segunda frecuencia de resonancia. Casi todos los objetos que pueden vibrar tienen múltiples frecuencias de resonancia, de las que hablaré enseguida más extensamente. Tu comba tiene frecuencias de resonancia más altas, que puedo mostrarte.

En clase utilizo una comba para demostrar las múltiples frecuencias de resonancia colgando una sola cuerda, de unos tres metros de longitud, entre dos barras verticales. Cuando muevo un extremo de la cuerda arriba y abajo (solo un par de centímetros), haciendo que oscile la barra mediante un pequeño motor cuya frecuencia puedo cambiar, enseguida llego a su frecuencia de resonancia más baja, que llamamos primer armónico (o frecuencia fundamental), y creo un arco como el de la comba. Cuando acelero las oscilaciones del extremo de la cuerda, pronto se ven dos arcos, imágenes especulares el uno del otro. Es el llamado segundo armónico y aparece cuando la cuerda oscila a un ritmo dos veces más alto que el del primer armónico. Así que, si el primer armónico aparece a 2 hercios, dos vibraciones por segundo, el segundo está a 4 hercios. Si hacemos que el extremo oscile todavía más rápido, cuando llegamos a tres veces la frecuencia del primer armónico (6 hercios, en este caso), alcanzamos el tercer armónico. Vemos que la cuerda se divide en tres tercios iguales con dos puntos (nodos) inmóviles, y los arcos se mueven alternativamente hacia arriba y hacia abajo mientras el extremo sube y baja seis veces por segundo.

¿Recuerdas que he dicho que la nota más grave que podemos oír es de unos 20

hercios? Por eso no oyes que la comba produzca ninguna música; su frecuencia es demasiado baja. Pero si tocamos un tipo de cuerda diferente —como la de un violín o un violonchelo, por ejemplo—, sucede algo completamente distinto. Coge un violín. Mejor que no lo haga yo, créeme, no he mejorado nada en los últimos sesenta años.

Detrás de la nota larga, hermosa y melancólica de un violín, hay muchísima física. El sonido de un violín, un violonchelo, un arpa o de la cuerda de una guitarra —o de cualquier hilo o cuerda— depende de tres factores: su longitud, su tensión y su peso. Cuanto más larga y más pesada es la cuerda y menor es su tensión, más bajo es el tono. Y, por supuesto, al revés: cuanto más corta y más ligera es la cuerda y mayor es su tensión, más alto es el tono. Siempre que los músicos vuelven a utilizar sus instrumentos tras un tiempo sin hacerlo tienen que ajustar la tensión de sus cuerdas para que produzcan las frecuencias, o notas, correctas.

Y aquí es donde reside la magia. Cuando el violinista frota la cuerda con un arco, le está suministrando energía a la cuerda, que de alguna forma elige sus propias frecuencias de resonancia (de todas las vibraciones posibles) y —esta es la parte aún más alucinante—, aunque no podemos verlo, vibra simultáneamente a varias de las frecuencias de resonancia (varios armónicos). No es como un diapasón, que solo puede vibrar a una única frecuencia.

Estos armónicos adicionales (con frecuencias por encima de la fundamental) suelen llamarse sobretonos. La interacción de las distintas frecuencias resonantes, unas más fuertes, otras más débiles —el cóctel de armónicos—, es lo que da a la nota del violín o del violonchelo lo que se conoce técnicamente como su color o timbre, pero que nosotros reconocemos como su sonido característico. Esa es la diferencia entre el sonido compuesto por una sola frecuencia del diapasón, el audiómetro o un mensaje de emergencia en la radio, y el sonido mucho más complejo de los instrumentos musicales, que vibran a varias frecuencias armónicas simultáneamente. Los sonidos característicos de la trompeta, el oboe, el piano o el violín se deben al singular cóctel de frecuencias armónicas que produce cada instrumento. Me encanta imaginar a un camarero cósmico invisible, experto en crear cientos de cócteles armónicos diferentes, que le puede servir un banjo a este cliente, unos timbales al siguiente y un erhu o un trombón al de más allá.

Quienes crearon los primeros instrumentos musicales tuvieron el ingenio de incorporar otra característica fundamental de los instrumentos que nos permite disfrutar de su sonido. Para oír música, las ondas sonoras no solo han de estar dentro del rango de frecuencias que puedes percibir, sino que deben tener el suficiente volumen para que las oigas. No basta con puntear una cuerda, por ejemplo, para que se produzca suficiente sonido como para que se oiga a lo lejos. Puedes suministrar más energía a la cuerda (y, por tanto, a las ondas sonoras que produce) punteándola con más fuerza, pero tampoco así producirás un sonido muy intenso. Por suerte, hace muchísimos años, milenios como mínimo, los seres humanos descubrieron la manera de hacer que los instrumentos de cuerda produjesen un sonido lo suficientemente fuerte como para que se les oyese al otro lado de un claro del bosque o de una habitación.

Puedes reproducir el mismo problema al que se enfrentaron nuestros antepasados y resolverlo. Coge un trozo de cuerda de unos 30 centímetros, ata un extremo al pomo de una puerta o al asa de un cajón, tira del otro extremo hasta que esté tenso y después puntéalo con la otra mano. No pasa nada, ¿verdad? Puedes oírlo y, dependiendo de la longitud de la cuerda, de su grosor y de la tensión con la que lo sujetes, puedes llegar a tocar una nota reconocible. Pero el sonido no es muy fuerte, ¿verdad? Nadie lo oiría en la habitación de al lado. Si coges un vaso de plástico, pasas la cuerda por el vaso, la levantas de manera que forme un ángulo con el pomo o el asa (para que no se deslice hacia tu mano) y punteas la cuerda, oirás un sonido más alto. ¿Por qué? Porque la cuerda transmite parte de su energía al vaso, que vibra a la misma frecuencia, pero tiene una superficie mucho mayor a través de la cual comunicar sus vibraciones al aire. Como resultado, oyes un sonido más fuerte.

Con tu vaso, has demostrado el principio de la caja de resonancia, que es fundamental para todos los instrumentos de cuerda, desde la guitarra y los contrabajos a los violines y el piano. Suelen estar hechas de madera y recogen las vibraciones de las cuerdas y transmiten estas frecuencias al aire, amplificando enormemente el sonido de las cuerdas.

Las cajas de resonancia se ven fácilmente en guitarras y violines. En un piano de cola, la caja de resonancia es plana, horizontal y está situada bajo las cuerdas, que

se montan sobre ella. En un piano de pared es vertical y está situada detrás de las cuerdas. En un arpa, la caja de resonancia suele ser la base a la que están sujetas las cuerdas.

En clase demuestro de varias maneras cómo funciona una caja de resonancia. En una de ellas utilizo un instrumento musical que mi hija Emma fabricó en la guardería. Es un simple hilo atado a una caja de cartón de Kentucky Fried Chicken. Puedes cambiar la tensión del hilo utilizando una pieza de madera. Es realmente divertido. A medida que incremento la tensión va subiendo el tono. El recipiente de KFC es una caja de resonancia perfecta y mis alumnos pueden oír el punteo del hilo desde bastante lejos. Otra de mis demostraciones favoritas es con una caja de música que compré hace muchos años en Austria, del tamaño de una caja de cerillas y sin caja de resonancia. Cuando giras la manivela, toca música producida por unos dientes que vibran. Lo hago en clase y nadie puede oírla, ¡ni siquiera yo! Después la pongo sobre mi mesa de laboratorio y vuelvo a girar la manivela. Ahora todos los alumnos pueden oírla, incluso los que están al fondo de la gran sala de conferencias. Siempre me asombra lo efectiva que puede ser incluso una caja de resonancia muy sencilla.

Eso no significa que no sean a veces auténticas obras de arte. Hay mucho secretismo alrededor de la fabricación de instrumentos musicales de alta calidad. ¡Dudo mucho que Steinway & Sons te digan cómo construyen las cajas de resonancia de sus famosos pianos! Quizá hayas oído hablar de la famosa familia Stradivarius que construyó los violines más fantásticos y deseados en los siglos XVII y XVIII. Solo se sabe de la existencia de 540 violines Stradivarius; uno de ellos se vendió en 2006 por 3,5 millones de dólares. Varios físicos han investigado a fondo estos violines tratando de descubrir los «secretos de Stradivarius», con la esperanza de poder fabricar violines baratos con la misma mágica voz[24].

Buena parte de lo que hace que el sonido de determinadas combinaciones de notas nos resulte más o menos agradable guarda relación con las frecuencias y los armónicos. El par de notas más conocido, al menos en Occidente, es aquel en el que una de ellas tiene una frecuencia que es exactamente el doble de la de la otra. Se

[24] Puedes leer sobre algunas de estas investigaciones en www.sciencedaily.com/releases/2009/01/090122141228.htm.

dice que estas notas están separadas por una octava. Pero hay muchas otras combinaciones también agradables: acordes, terceras o quintas, entre otras.

Desde la época de Pitágoras en la antigua Grecia, los matemáticos y los «filósofos de la naturaleza» han sentido fascinación por las hermosas relaciones numéricas entre las diferentes frecuencias. Los historiadores no se ponen de acuerdo sobre hasta dónde llegaron los descubrimientos de Pitágoras, cuánto tomó prestado de los babilonios y cuánto descubrieron sus discípulos, pero es a él a quien se le reconoce el mérito de haber descubierto que las cuerdas de diferentes longitudes y tensiones producen distintos tonos en proporciones predecibles y agradables. A muchos físicos les encanta decir que fue el primer teórico de cuerdas.

Los fabricantes de instrumentos han hecho un uso genial de estos conocimientos. Las cuerdas de un violín, por ejemplo, tienen todas distintos pesos y tensiones, lo que les permite producir frecuencias y armónicos de distintas alturas, a pesar de que todas tienen aproximadamente la misma longitud. Los violinistas cambian la longitud de sus cuerdas moviendo los dedos a lo largo del astil del violín. Cuando acercan los dedos a sus barbillas, acortan la longitud de cualquiera de las cuerdas, aumentando la frecuencia (y, por tanto, el tono) del primer armónico y también del resto. Esto puede complicarse. Algunos instrumentos con cuerdas, como el sitar indio, tienen lo que se llama cuerdas simpáticas, cuerdas adicionales al lado o debajo de las que se tocan que vibran a sus propias frecuencias de resonancia cuando se toca el instrumento.

Es difícil, por no decir imposible, ver las múltiples frecuencias armónicas de las cuerdas de un instrumento, pero puedo mostrártelas de una forma espectacular conectando un micrófono a un osciloscopio, que probablemente hayas visto en la televisión o en persona. Un osciloscopio muestra en una pantalla una vibración —u oscilación— a lo largo del tiempo, como una línea que sube y baja, a ambos lados de una recta central. Son frecuentes en las unidades de cuidados intensivos y en los servicios de urgencias, para medir el ritmo cardíaco de los pacientes.

Siempre les pido a mis alumnos que traigan sus instrumentos musicales a clase para que podamos ver los distintos cócteles de armónicos que cada uno produce.

Cuando acerco un diapasón de la de concierto al micrófono, en la pantalla se ve una curva sinusoidal sencilla de 440 hercios. La línea es clara y muy regular, porque,

como hemos visto, el diapasón produce solo una frecuencia. Pero cuando invito a la estudiante que ha traído su violín a que toque el mismo la, la pantalla se pone mucho más interesante. La frecuencia fundamental sigue ahí —la puedes ver en la pantalla como la curva sinusoidal dominante—, pero la curva es ahora mucho más compleja debido a los armónicos superiores, y es distinta también a su vez cuando un alumno toca su violonchelo. ¡Imagínate cómo será cuando un violinista toca dos notas a la vez!

Cuando los cantantes demuestran la física de la resonancia al hacer que el aire atraviese sus cuerdas vocales («pliegues vocales» sería un término más descriptivo), unas membranas vibran y crean ondas sonoras. Le pido a un alumno que cante y el osciloscopio refleja la misma situación, en la pantalla se superponen curvas igualmente complicadas.

Cuando tocas el piano, la tecla que pulsas hace que un martillo golpee una cuerda —un cable— cuya longitud, peso y tensión se han elegido para que oscile con la frecuencia de un determinado primer armónico. Pero de alguna forma, igual que los violines y las cuerdas vocales, las cuerdas del piano también vibran simultáneamente con armónicos más altos.

Demos un enorme salto mental hasta el mundo subatómico e imaginemos superdiminutas cuerdas de violín, muchísimo más pequeñas que un núcleo atómico, que oscilan a distintas frecuencias y diferentes armónicos. En otras palabras, consideremos la posibilidad de que los componentes fundamentales de la materia sean estas minúsculas cuerdas vibrantes, que producen todas las llamadas partículas elementales —como los quarks, gluones, neutrinos y electrones— al vibrar a diferentes frecuencias armónicas y en muchas dimensiones. Si has conseguido dar este paso, acabas de entender la idea básica de la teoría de cuerdas, el término que engloba los intentos de los físicos teóricos en los últimos cuarenta años por descubrir una única teoría que dé cuenta de todas las partículas elementales y todas las fuerzas en el universo. En cierto sentido, es una teoría del «todo».

Nadie tiene ni idea de si la teoría de cuerdas tendrá éxito o no, y el premio Nobel Sheldon Glashow se pregunta si es «una teoría física o una filosofía». Pero si es cierto que las unidades más básicas del universo son los diferentes niveles de

resonancia de cuerdas inconcebiblemente pequeñas, entonces el universo, con sus fuerzas y partículas elementales, podría parecerse a una versión cósmica de las maravillosas variaciones de creciente complejidad que compuso Mozart a partir de «Campanita del lugar».

Todos los objetos tienen frecuencias de resonancia, desde el bote de ketchup que hay en tu nevera hasta el edificio más alto del mundo; muchas son enigmáticas y muy difíciles de predecir. Si tienes un coche, seguro que has oído resonancias y no te habrán hecho gracia. Seguro que has oído un ruido mientras conducías, que desaparecía cuando ibas más rápido.

En mi último coche, el salpicadero parecía que alcanzaba su frecuencia fundamental cuando esperaba en un semáforo. Si pisaba el acelerador, avivando el motor, incluso aunque no me moviese, cambiaba la frecuencia de las vibraciones del coche y el ruido desaparecía. A veces escuchaba durante un rato un ruido nuevo, que solía desaparecer al cambiar la velocidad. A diferentes velocidades, es decir, a diferentes frecuencias de vibración, el coche, y sus miles de partes, algunas de las cuales, por desgracia, estaban flojas, entraban en la frecuencia de resonancia de, pongamos, su silenciador suelto o los soportes del motor gastados y me hablaban. Todos me decían lo mismo —«Llévame al taller, llévame al taller»— y yo casi nunca les hacía caso, y acababa descubriendo más tarde el daño que estas resonancias habían causado. Cuando por fin llevaba el coche al taller, no conseguía reproducir los espantosos sonidos y me sentía un poco estúpido.

Recuerdo que, cuando estaba estudiando, si tras la cena venía a nuestra asociación un conferenciante que no nos gustaba, humedecíamos los dedos y los pasábamos por el borde de las copas de vino, algo que puedes hacer fácilmente en casa, y producíamos un sonido con la frecuencia fundamental de las copas. Si cientos de alumnos lo hacían a la vez resultaba muy molesto, por supuesto (al fin y al cabo, se trataba de una asociación de estudiantes), pero también era muy efectivo y los conferenciantes captaban el mensaje.

Todo el mundo ha oído que si una cantante de ópera canta la nota apropiada con la suficiente fuerza puede romper una copa. Ahora que ya conoces cómo funciona la resonancia, ¿cómo es posible eso? Es sencillo, al menos en teoría, ¿verdad? Si coges la copa, mides su frecuencia fundamental y generas un sonido a esa

frecuencia, ¿qué pasaría? Según mi experiencia, casi nunca pasa nada. Nunca he visto que una cantante de ópera lo haga, así que no la utilizo en clase. Cojo una copa, le doy golpecitos y mido su frecuencia fundamental con un osciloscopio; evidentemente, varía de una copa a otra, pero para las que utilizo siempre está en el rango entre 440 y 480 hercios. Después genero electrónicamente un sonido con la frecuencia fundamental exacta de la copa (bueno, exactamente nunca es posible, pero intento aproximarme mucho). Lo conecto a un amplificador y voy subiendo el volumen lentamente. ¿Por qué subir el volumen? Porque cuanto más fuerte sea el sonido más energía llevará la onda sonora que llegue a la copa. Y cuanto mayor sea la amplitud de las vibraciones de la copa, más se deformará el cristal, hasta romperse (esperemos).

Para mostrar cómo vibra el cristal, hago zoom sobre él con una cámara y lo ilumino con un estroboscopio, ajustado a una frecuencia ligeramente distinta de la del sonido. ¡Es fantástico! Ves que el cuenco de la copa empieza a vibrar; las dos caras opuestas se contraen y después se separan, y la distancia que se desplazan aumenta a medida que voy subiendo el volumen del altavoz. A veces tengo que ajustar un poco la frecuencia y entonces, ¡puf!, la copa estalla. Esta es siempre la mejor parte para los alumnos, que están deseosos de ver cómo estalla la copa[25].

También me encanta mostrar a los alumnos las llamadas placas de Chladni, que ponen de manifiesto, de la manera más extraña y hermosa, los efectos de la resonancia. Estas placas de metal tienen unos 30 centímetros de ancho y pueden ser cuadradas, rectangulares o incluso circulares, pero las mejores son las cuadradas. Sus centros están sujetos a una barra o base. Espolvoreamos algún polvo fino sobre la placa y después frotamos un arco de violín, en toda su longitud, en uno de los lados. La placa comenzará a oscilar en una o más de sus frecuencias de resonancia. En los picos y los valles de las ondas de la vibración en la placa, el polvo se sacudirá, quedando el metal al descubierto; se acumulará en los nodos, donde la placa no vibra en absoluto. (Las cuerdas tienen puntos nodales, pero los objetos bidimensionales, como la placa de Chladni, tienen líneas nodales.)

Dependiendo de cómo y dónde «toques» la placa al frotarla con el arco, excitas

---

[25] Puedes verlo online en la clase 27 de mi curso de Electricidad y Magnetismo, 8.02, alrededor del minuto 6, en http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetismspring-2002/video-lectures/lecture-27-resonance-and-destructiveresonance/.

distintas frecuencias de resonancia y creas dibujos asombrosos y completamente inesperados sobre su superficie. En clase utilizo una técnica más eficiente —pero mucho menos romántica— y conecto la placa a un vibrador. Al cambiar la frecuencia del vibrador, vemos cómo los dibujos más extraordinarios aparecen y desaparecen[26].

En las clases que doy para niños y familias, invito a los pequeños a que froten los bordes de la placa con el arco; les encanta crear esos dibujos tan hermosos y misteriosos. Eso es lo que intento transmitir sobre la física.

La música de los vientos

¡Pero nos hemos olvidado de la mitad de la orquesta! ¿Qué pasa con la flauta, el oboe o el trombón? Al fin y al cabo, no tienen una cuerda que vibre ni una caja de resonancia para proyectar su sonido. Aunque son muy antiguos —hace tiempo vi en el periódico la fotografía de una flauta de hace 35.000 años tallada en un hueso de buitre—, los instrumentos de viento son un poco más enigmáticos que los de cuerda, en parte porque su mecanismo es invisible.

Por supuesto, existen distintos tipos de instrumentos de viento. Algunos, como las flautas y las flautas dulces, tienen ambos extremos abiertos, mientras que los clarinetes, los oboes y los trombones tienen un extremo cerrado (aunque tienen aberturas por las que se puede soplar). Pero todos producen música cuando una entrada de aire, normalmente desde la boca, provoca la vibración de la columna de aire en el interior del instrumento.

Cuando soplas o haces que entre aire dentro de un instrumento de viento es como si punteases la cuerda de una guitarra o excitases la cuerda de un violín con un arco: al transmitir energía a la columna de aire, estás volcando todo un espectro de frecuencias en esa cavidad de aire, y la propia columna de aire escoge la frecuencia a la que quiere resonar, dependiendo principalmente de su longitud. En cierto sentido, es difícil imaginarlo, pero, mediante una fórmula relativamente fácil de calcular, la columna de aire en el interior del instrumento elegirá su frecuencia fundamental y también algunos de los armónicos superiores, y empezará a vibrar a

---

[26] Puedes ver de qué estoy hablando aquí, en YouTube: www.youtube.com/watch?v=6wmFAwqQB0g. ¡Imagínate las matemáticas en que se basan esos dibujos!

esas frecuencias. Una vez que la columna de aire empieza a vibrar, mueve el aire de un lado a otro, como los dientes del diapasón, enviando ondas sonoras hacia los oídos de quienes escuchan.

En los oboes, clarinetes y saxofones, soplas en una lengüeta, que transfiere la energía a la columna de aire y hace que resuene. En las flautas, flautines y flautas dulces, lo que crea la resonancia es la forma en que quien los toca sopla por un agujero o en una boquilla. Y en los instrumentos de metal tienes que juntar los labios con fuerza y soplar con una especie de zumbido en el instrumento (es imposible hacerlo si no has practicado). ¡Yo acabo escupiendo dentro del maldito chisme!

Si el instrumento tiene ambos extremos abiertos, como una flauta o un flautín, la columna de aire puede vibrar en sus armónicos, cada uno de los cuales es un múltiplo de la frecuencia fundamental, como sucedía con las cuerdas. Para instrumentos de madera que tienen un extremo cerrado y otro abierto, es importante la forma del tubo. Si el taladro es cónico, como el del oboe o el saxofón, el instrumento producirá todos los armónicos, pero si es cilíndrico, como el del clarinete, la columna de aire solo resonará a frecuencias que sean múltiplos impares de la fundamental: tres veces, cinco veces, siete veces, etcétera. Por motivos complicados, todos los instrumentos de metal resuenan en todos los armónicos, como la flauta.

Lo que es más intuitivo es que cuanto más larga es la columna de aire más baja es la frecuencia y más grave el tono del sonido que produce. Si se reduce la longitud del tubo a la mitad, la frecuencia del primer armónico se multiplicará por dos. Por eso el flautín emite notas tan agudas, el fagot toca notas tan graves y el didgeridoo australiano emite tonos aún más graves. Este principio general también explica por qué los saxofones más pequeños, los saxos soprano y alto, emiten notas más agudas que el saxo barítono, grande y largo. Asimismo es la razón por la que un órgano tubular tiene tubos de longitudes tan variadas (algunos órganos pueden producir sonidos en nueve octavas). Hace falta un tubo enorme —de 19,5 metros, abierto por ambos extremos— para producir una frecuencia fundamental de 8,7 hercios, por debajo de lo que el oído humano puede oír, aunque puedes sentir las vibraciones. Solo existen dos tubos tan enormes en el mundo, ya que no son

manejables en absoluto. Un tubo diez veces más corto producirá una frecuencia fundamental diez veces más alta, de 87 hercios. Un tubo cien veces más corto producirá una frecuencia fundamental de unos 870 hercios.

Los instrumentistas de viento no solo soplan en sus instrumentos. También abren o cierran agujeros que sirven para acortar o alargar en la práctica la columna de aire. Por eso, cuando jugueteas con un silbato de juguete, los tonos más graves se producen cuando tapas con tus dedos todos los agujeros, alargando la columna de aire. El mismo principio se aplica a los instrumentos de metal. Cuanto más larga sea la columna de aire, incluso aunque esté enrollada en espiral, más grave es el tono, o, lo que es lo mismo, más bajas serán las frecuencias de todos los armónicos. La tuba de tono más grave, la tuba en si bemol, tiene un tubo de cinco metros y medio de longitud con una frecuencia fundamental de unos 30 hercios; unas válvulas adicionales, llamadas válvulas rotatorias, pueden rebajar el tono más grave hasta los 20 hercios; el tubo de una trompeta en si bemol no llega al metro y medio. Los botones de una trompeta o una tuba abren y cierran tubos adicionales, cambiando el tono de las frecuencias de resonancia. Es más fácil entenderlo visualmente con el trombón. Al tirar de la vara se alarga la columna de aire, haciendo que bajen sus frecuencias de resonancia.

En clase, toco «Jingle Bells» con un trombón de madera y a mis alumnos les encanta (nunca les digo que es la única canción que sé tocar). De hecho, tengo tantas limitaciones como músico que, por muchas veces que haya dado la clase, siempre tengo que practicar antes. Incluso he hecho marcas en la vara —notas, en realidad— y las he numerado 1, 2, 3, etcétera; ni siquiera sé leer notas musicales. Pero como he dicho antes, mi absoluta carencia de talento musical no ha impedido que disfrute de la belleza de la música o que me lo pase muy bien experimentando con ella.

Mientras escribo esto, me divierto haciendo experimentos con la columna de aire en el interior de una botella de plástico de un litro. No es en absoluto una columna perfecta, ya que el cuello se abre gradualmente hasta alcanzar el diámetro completo de la botella. La física de un cuello de botella puede llegar a ser muy complicada, como te puedes imaginar, pero el principio básico de la música de los instrumentos de viento —cuanto más larga es la columna de aire, más bajas las frecuencias de

resonancia— sigue siendo válido. Puedes hacer la prueba fácilmente.

Llena casi hasta arriba (¡con agua!) una botella vacía de refresco o de vino e intenta soplar en ella. Hay que practicar un poco, pero enseguida conseguirás que la columna de aire vibre a sus frecuencias de resonancia. El sonido empezará teniendo un tono alto, pero a medida que vayas bebiendo (ahora ves por qué he propuesto agua) la columna de aire irá alargándose y el tono de la frecuencia fundamental irá bajando. Además, cuanto más larga es la columna de aire, más agradable me resulta el sonido. Cuanto más baja sea la frecuencia del primer armónico, más probable es que se generen armónicos adicionales a frecuencias más altas, y el sonido tenga un timbre más complejo.

Puedes pensar que es la vibración de la botella, como la de la cuerda, la que genera el sonido, y de hecho sientes cómo vibra la botella, igual que puedes sentir cómo vibra un saxofón. Pero es la columna de aire en su interior la que resuena. Para que te quede claro, plantéate este problema: si coges dos copas idénticas, una vacía y otra medio llena, y excitas el primer armónico en cada una de ellas dando golpecitos con una cuchara o pasando un dedo mojado por su borde, ¿qué frecuencia será más alta? ¿Por qué? No es justo que te haga esta pregunta, porque te he dirigido hacia una respuesta equivocada —¡lo siento!—, pero quizá lo resuelvas.

El mismo principio interviene en esos tubos de colores de plástico acanalado flexible, de unos 75 centímetros, llamados tubos enrollados o algo parecido, que probablemente has visto o con los que has jugado. ¿Recuerdas cómo funcionan? Cuando empiezas a hacerlos girar sobre tu cabeza, primero oyes un tono de baja frecuencia. Evidentemente, imaginas que se trata del primer armónico, como yo cuando jugué con ellos por primera vez. Sin embargo, por alguna razón nunca he conseguido excitar el primer armónico, siempre oigo antes el segundo. Cuando aceleras, puedes excitar armónicos cada vez más altos. Los anuncios en internet aseguran que puedes conseguir cuatro tonos de estos tubos, pero solo puedes sacar tres; para el cuarto tono, que es el quinto armónico, hay que darles vueltas realmente rápido. Calculé la frecuencia de los primeros cinco armónicos para un tubo de 75 centímetros y obtuve 223 hercios (nunca lo he conseguido), 446 hercios, 669 hercios, 892 hercios y 1.115 hercios. El tono enseguida se eleva mucho.

Peligrosa resonancia

La física de la resonancia va mucho más allá de las demostraciones en clase. Piensa en los distintos estados de ánimo que puede producir la música con estos diferentes instrumentos. La resonancia musical afecta a nuestras emociones, provocándonos alegría, ansiedad, tranquilidad, asombro, miedo, dicha o tristeza, entre otros. No es de extrañar, por tanto, que hablemos de experimentar resonancia emocional, que puede dar lugar a una relación plena de riqueza y profundidad, con sobretonos de comprensión, ternura y deseo. No es casualidad que queramos estar «en sintonía» con otra persona. Y cómo sufrimos cuando perdemos esa resonancia, ya sea temporal o definitivamente, y lo que parecía armonía se convierte en interferencia discordante y ruido emocional. Piensa en los personajes de George y Martha en la obra ¿Quién teme a Virginia Woolf ?, de Edward Albee. Se pelean ferozmente. Cuando se enfrentan el uno a la otra, el ambiente se caldea y no pueden evitar montar un espectáculo ante sus invitados. Son mucho más peligrosos cuando unen sus fuerzas para jugar a «quedarse con el invitado».

La resonancia en física también puede ser extremadamente destructiva. El ejemplo más espectacular en la historia reciente sucedió en noviembre de 1940, cuando un viento lateral sacudió la luz principal del puente de Tacoma Narrows justo de la forma precisa. Esta maravilla de la ingeniería (que se había ganado el sobrenombre de Galloping Gertie [«Gertie la Galopante»] por sus oscilaciones verticales) empezó a resonar con fuerza. A medida que el viento lateral hizo que creciese la amplitud de las oscilaciones del puente, la estructura empezó a vibrar y a retorcerse, cada vez más intensamente, hasta que la luz se partió y el puente se precipitó al agua[27].

Noventa años antes, en Angers, Francia, un puente colgante sobre el río Maine se hundió cuando 478 soldados lo atravesaban en formación, marchando al unísono. Su marcha excitó una resonancia del puente, que provocó la ruptura de unos cables corroídos; más de 200 soldados murieron al caer al río. Este desastre provocó que no se construyesen más puentes de suspensión en Francia durante veinte años. En 1831, los soldados británicos que atravesaban el puente colgante de Broughton marchando al unísono provocaron que la cubierta entrase en resonancia, que se saliese uno de los pernos en un extremo del puente y que este se hundiese. No

[27] Puedes ver este espectacular hundimiento en www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxnw.

hubo víctimas mortales, pero a partir de entonces el ejército británico ordenó a sus tropas que rompiesen la formación al cruzar un puente.

El puente del Milenio de Londres fue inaugurado en 2000 y muchos miles de peatones descubrieron que se bamboleaba bastante (tenía lo que los ingenieros llaman resonancia lateral); unos pocos días después, las autoridades cerraron el puente durante dos vergonzosos años para colocar amortiguadores que permitiesen controlar el movimiento provocado por los pasos de los peatones. Incluso el gran puente de Brooklyn en Nueva York dio un buen susto a los peatones que se apiñaban en él durante un apagón eléctrico en 2003 cuando sintieron un balanceo lateral en la cubierta que hizo que algunos se mareasen.

En situaciones como estas, el peso de los peatones supera el de los coches que suelen atravesar el puente y el movimiento combinado de sus pies, aunque no estén acompasados, puede empezar a excitar una vibración de resonancia —un bamboleo— en la cubierta del puente. Incluso los ingenieros reconocen que no saben lo suficiente sobre los efectos que las aglomeraciones de gente pueden tener sobre los puentes. Por suerte, sí saben mucho sobre cómo construir rascacielos capaces de resistir fuertes vientos y terremotos capaces de generar frecuencias de resonancia que puedan destruir sus creaciones. Piénsalo: los mismos principios que produjeron el melancólico sonido de la flauta de nuestros antepasados de hace 35.000 años podrían poner en peligro el imponente y enorme puente de Brooklyn y los edificios más altos del mundo.

Capítulo 7

Las maravillas de la electricidad

Este experimento sale mejor en invierno, cuando el aire está muy seco. Asegúrate de que la camiseta o la sudadera que llevas es de poliéster, ponte frente al espejo a oscuras y empieza a quitártela. Habrás adivinado que oirás chisporroteos, como cuando sacas la colada de la secadora (a menos que hayas utilizado una de esas hojas tan poco románticas diseñadas para reducir la electricidad). Pero también verás el resplandor de muchas chispas diminutas. Me encanta hacer esto porque me recuerda lo cerca que está la física de nuestra experiencia cotidiana, si sabemos cómo buscarla. Y, como me gusta recalcarles a mis alumnos, lo cierto es que esta pequeña demostración es incluso más divertida si la haces con un amigo.

Sabes que si pasas por una alfombra en invierno y luego tocas el pomo de una puerta —¿sientes escalofríos?— te puede dar calambre, y sabes que es por la electricidad estática. Probablemente también le hayas dado calambre a una amiga al darle la mano, o lo hayas sentido cuando has dejado tu abrigo en el guardarropa. Sinceramente, parece que en invierno la electricidad estática está por todas partes. Puedes notar cómo tu pelo se separa cuando te lo cepillas y a veces se te queda de punta al quitarte el sombrero. ¿Qué pasa en invierno? ¿Por qué hay tantas chispas en el aire?

La respuesta a estas preguntas se remonta a los antiguos griegos, que fueron los primeros en ponerle nombre al fenómeno que hemos acabado conociendo como electricidad y en dejar constancia de ello por escrito. Hace bastante más de dos mil años, los griegos ya sabían que si frotabas ámbar —resina fosilizada con la que los egipcios y los griegos fabricaban joyas— con un paño, el ámbar atraía pedazos de hojas secas. Si lo frotabas lo suficiente, incluso podía producir una descarga.

He leído historias que aseguran que cuando los griegos se aburrían en las fiestas las mujeres frotaban sus joyas de ámbar con sus ropas y luego las acercaban a las ranas. Las ranas, por supuesto, saltaban tratando de escapar desesperadamente de las desenfrenadas mujeres, lo que al parecer divertía mucho a los antiguos griegos. Estas historias no tienen ningún sentido. Para empezar, ¿en cuántas fiestas puedes imaginar que hubiese muchas ranas esperando a ser electrocutadas por juerguistas

borrachas? En segundo lugar, por motivos que explicaré en breve, la electricidad estática no funciona tan bien durante los meses en que es más probable ver ranas, cuando el aire es húmedo, sobre todo en Grecia. Independientemente de lo que haya de cierto en esta historia, lo que es innegable es que la palabra griega para «ámbar» es elektron, de forma que sí fueron los griegos quienes le dieron nombre a la electricidad, y a tantas otras cosas en el universo, pequeñas y grandes.

Los físicos europeos de los siglos XVI y XVII, cuando la física se conocía como filosofía natural, no sabían nada de los átomos o sus componentes, pero eran excelentes observadores, experimentadores e inventores, y algunos también eran estupendos teóricos. Tycho Brahe, Galileo Galilei, Johannes Kepler, Isaac Newton, René Descartes, Blaise Pascal, Robert Hooke y Robert Boyle, Gottfried Leibniz y Christian Huygens, todos hicieron descubrimientos, escribieron libros, discutieron entre ellos y sacudieron los cimientos de la escolástica medieval.

En la década de 1730 se estaban llevando a cabo estudios verdaderamente científicos de la electricidad (en contraposición a los trucos de salón) en Inglaterra, Francia y, por supuesto, en Filadelfia. Todos estos experimentadores habían descubierto que al frotar una barra de cristal con un trozo de seda, aquella acumulaba algún tipo de carga (llamémosla A), pero que si lo que se frotaba era ámbar o caucho, adquiría una carga distinta (llamémosla B, de momento). Sabían que las cargas eran distintas porque cuando acercaban dos barras de cristal que habían frotado con seda, ambas cargadas con A, se repelían con una fuerza completamente invisible pero no obstante palpable. Y, sin embargo, objetos con distinta carga, como una barra de cristal (A) y una barra de caucho (B) se atraían en lugar de repelerse.

Que los objetos se carguen al frotarlos es un fenómeno realmente enigmático y tiene incluso un nombre maravilloso, el efecto «triboeléctrico», del término griego para «frotar». Parece como si la fricción entre dos objetos fuese lo que produce la carga, pero no es así. Resulta que algunos materiales atraen ávidamente la carga B, mientras que otros están deseando perderla, obteniendo así carga A. El frotamiento funciona porque aumenta el número de puntos de contacto entre las sustancias, facilitando la transferencia de carga. Existe una lista ordenada de muchos materiales que constituyen la «serie triboeléctrica» (la puedes encontrar fácilmente

online); cuanto mayor sea la distancia entre dos materiales en la escala, más fácil es que se carguen entre sí.

Tomemos por ejemplo el plástico o la goma dura con la que se fabrican normalmente los peines. Se encuentran bastante lejos del pelo humano en la serie triboeléctrica, lo que explica la facilidad con la que el pelo puede soltar chispas y ponerse de punta cuando te peinas en invierno (sobre todo, mi pelo). Piénsalo: no solo echa chispas, sino que si me peino con fuerza estoy cargando tanto el peine como mi pelo; pero como todo el pelo adquiere la misma carga, sea la que sea, cada pelo cargado repelerá todos los demás y pareceré un científico loco. Cuando arrastras los pies por una alfombra, te cargas con A o B, dependiendo del material de las suelas de tus zapatos y del de la alfombra. Cuando te da calambre el pomo más cercano, tu mano está recibiendo carga del pomo o bien transmitiéndosela. Independientemente de la carga que tengas, ¡sientes el calambrazo igual!

Fue Benjamin Franklin —diplomático, estadista, editor, filósofo político, inventor de las lentes bifocales, las aletas, el odómetro y la estufa salamandra— quien propuso la idea de que las sustancias están impregnadas con lo que llamó «fluido eléctrico» o «fuego eléctrico». Esta teoría resultó ser muy convincente, porque parecía explicar los resultados experimentales de sus camaradas los filósofos naturales. El inglés Stephen Gray, por ejemplo, había demostrado que la electricidad se podía transportar a distancia a través de un cable de metal, por lo que la idea de un fluido habitualmente invisible o de un fuego (al fin y al cabo, las chispas parecen fuego) tenía sentido.

Según Franklin, si acumulabas demasiado fuego estarías cargado positivamente, mientras que si tenías una carencia estarías cargado negativamente. También propuso la convención de utilizar los signos positivo y negativo y decidió que cuando frotabas cristal con un trozo de lana o de seda (produciendo carga A) le transmitías un exceso de fuego y, por tanto, debería ser positivo.

Franklin no sabía qué era lo que producía la electricidad, pero su idea del fluido eléctrico era brillante y útil, aunque no fuese del todo correcta. Afirmó que si se trasvasaba el fluido de una sustancia a otra, la que lo recibía pasaría a estar cargada positivamente, mientras que aquella de la que se extraería el fluido quedaba cargada negativamente. Franklin había descubierto la ley de conservación

de la carga eléctrica, que afirma que la carga no se puede crear ni destruir: si creas una determinada cantidad de carga positiva, automáticamente creas la misma cantidad de carga negativa. La carga eléctrica es un juego de suma cero, o, como dirían los físicos, la carga se conserva.

Franklin entendió, como nosotros hoy en día, que las cargas iguales (positiva y positiva, negativa y negativa) se repelen y que las cargas opuestas (positiva y negativa) se atraen. Sus experimentos le hicieron ver que cuanto más fuego tenían los objetos y más cerca estaban entre sí, mayores eran las fuerzas, ya fuesen de atracción o repulsión. Descubrió asimismo, como también lo hicieron más o menos al mismo tiempo Gray y otros, que algunas sustancias conducen el fluido o el fuego —ahora a esas sustancias las llamamos conductoras— y otras no, denominadas no conductoras o aislantes.

Lo que Franklin no llegó a entender es de qué se compone en realidad el fuego. Si no es fuego o fluido, ¿qué es? ¿Y por qué parece que hay mucho más en invierno (al menos donde yo vivo, en el nordeste de Estados Unidos), dándonos calambres continuamente?

Antes de echar un vistazo dentro del átomo para lidiar con la naturaleza del fuego eléctrico, tenemos que ver cómo la electricidad impregna nuestro mundo mucho más de lo que Franklin imaginó, y mucho más de lo que la mayoría de nosotros somos conscientes. No solo mantiene unidas la mayoría de las cosas que experimentamos a diario, sino que hace posible todo lo que vemos, conocemos y hacemos. Si podemos pensar, sentir, reflexionar y hacernos preguntas es gracias a que hay cargas eléctricas que saltan entre innumerables millones de los aproximadamente 100.000 millones de células que componen nuestro cerebro. Al mismo tiempo, si podemos respirar es gracias a que los impulsos eléctricos producidos por los nervios hacen que varios músculos de nuestro pecho se contraigan y se relajen en una complicada sinfonía de movimientos. Un ejemplo de lo más sencillo: cuando tu diafragma se contrae y tira del tórax hacia abajo, hace que crezca la cavidad torácica y que el aire entre en los pulmones. Ninguno de estos movimientos sería posible sin los innumerables diminutos impulsos eléctricos que envían constantemente mensajes por todo el cuerpo, en este caso diciéndoles a los músculos que se contraigan y que dejen de contraerse mientras otros toman el

relevo. Una y otra vez, una y otra vez, durante toda tu vida.

Nuestros ojos ven porque las diminutas células de nuestras retinas, los bastones y los conos sensibles al blanco y negro y a los colores, respectivamente, son estimuladas por lo que detectan y envían señales eléctricas a través de los nervios ópticos a nuestros cerebros, que determinan si lo que estamos mirando es un puesto de frutas o un rascacielos. La mayoría de nuestros coches funcionan con gasolina, aunque los híbridos cada vez utilizan más electricidad, pero ningún motor podría consumir gasolina sin la electricidad que fluye desde la batería hasta los cilindros, pasando por el sistema de encendido, donde las chispas eléctricas provocan miles de explosiones controladas por minuto. Como las moléculas se forman por las fuerzas eléctricas que unen los átomos, las reacciones químicas —como la combustión de la gasolina— serían imposibles sin electricidad. Es la electricidad la que hace que los caballos corran, que los perros jadeen y que los gatos se estiren. La electricidad hace que el plástico de envolver se arrugue, que la cinta de embalar se pegue y que la envoltura de celofán parezca no querer separarse de la caja de bombones. Difícilmente puede esta lista ser exhaustiva, pero lo cierto es que nada de lo que podamos imaginar existiría sin la electricidad; ni siquiera podríamos pensar sin la electricidad.

Esto sigue siendo así cuando nos fijamos en cosas aún más pequeñas que las células microscópicas de nuestros cuerpos. Cualquier pedazo de materia en la Tierra está formado por átomos, y para entender realmente la electricidad tenemos que penetrar en el átomo y echar un vistazo a las partes que lo componen (no a todas, porque eso sería increíblemente complicado, sino solo a las que nos interesan).

Los propios átomos son tan minúsculos que solo se pueden ver con los instrumentos más potentes e ingeniosos (microscopios de efecto túnel, microscopios de fuerza atómica y microscopios electrónicos de transmisión). (En la web hay imágenes asombrosas tomadas con estos instrumentos[28]. Si cogiese 6.500 millones de átomos, aproximadamente el número de personas que hay en la Tierra, y los colocase en fila, en contacto cada uno con el siguiente, tendría una línea de unos 60 centímetros. Pero incluso más pequeño que un átomo, unas diez mil veces más pequeño, es su núcleo, que contiene protones, con carga positiva, y neutrones.

[28] Puedes ver algunas en este enlace: www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html.)

Estos últimos, como puedes deducir de su nombre, son eléctricamente neutros; no tienen ninguna carga. Los protones (del término griego para «primero») tienen aproximadamente la misma masa que los neutrones —la inconcebiblemente pequeña cantidad de dos milésimas de billonésima de billonésima (2 × 10-27) de kilogramo, aproximadamente—. Por lo tanto, independientemente del número de protones y neutrones que tenga un núcleo —y algunos tienen más de doscientos—, sigue siendo muy ligero. Y minúsculo: alrededor de una billonésima de centímetro de diámetro.

Lo más importante para entender la electricidad, sin embargo, es que el protón tiene carga positiva. No hay una razón intrínseca por la que se le llame positiva, pero, desde Franklin los físicos han llamado positiva a la carga que adquiere una barra de cristal cuando se frota con seda, así que los protones son positivos.

Todavía más importante resulta ser el resto del átomo, compuesto por electrones: partículas de carga negativa que pululan en una nube alrededor del núcleo, a una considerable distancia, a escala subatómica. Si tienes una pelota de béisbol en la mano, que represente el núcleo atómico, la nube de electrones a su alrededor llegaría hasta unos 800 metros de distancia. Evidentemente, la mayor parte del espacio atómico está vacío.

La carga negativa del electrón tiene la misma magnitud que la carga positiva del protón. Por eso, los átomos y las moléculas que tienen el mismo número de protones y de electrones son eléctricamente neutros. Cuando no lo son, y tienen un exceso o un defecto de electrones, se llaman iones. Los plasmas, como hemos visto en el capítulo 6, son gases parcial o totalmente ionizados. La mayoría de los átomos y las moléculas con los que tratamos en la Tierra son eléctricamente neutros. En el agua pura a temperatura ambiente solo una de cada 10 millones de moléculas está ionizada.

Según la convención de Franklin, cuando los objetos tienen sobreabundancia de electrones decimos que están cargados negativamente y, cuando tienen déficit de electrones, que tienen carga positiva. Cuando frotas un cristal contra un trozo de seda «despegas» (más o menos) muchos electrones, por lo que el cristal acaba con carga positiva. Cuando frotas ámbar o caucho con el mismo trozo de seda, acumulan electrones y acaban con carga negativa.

En la mayoría de los metales, grandes cantidades de electrones han escapado de sus átomos y se desplazan más o menos libremente entre ellos. Estos electrones son particularmente sensibles a una carga externa, ya sea negativa o positiva, y cuando esta se aplica se acercan o alejan de ella, creando así una corriente eléctrica. Tengo muchas más cosas que decir sobre la corriente, pero de momento solo apuntaré que estos materiales se llaman conductores, porque conducen (permiten el movimiento de) partículas cargadas con facilidad, en este caso de electrones. (Los iones también pueden crear corrientes eléctricas, pero no en sólidos, y por tanto no en metales.)

Me gusta mucho la idea de los electrones preparados para reaccionar, para moverse, para responder a cargas positivas o negativas. En los materiales no conductores hay muy poco movimiento de este tipo, todos los electrones están bien ligados a sus átomos individuales. Pero eso no significa que no podamos divertirnos con los no conductores, sobre todo en forma de un globo de goma normal y corriente.

Puedes probar todo lo que estoy diciendo aquí haciéndote con una caja pequeña de globos de goma sin inflar (mejor si son alargados, como esos que puedes retorcer para crear animales). Como la mayoría de vosotros no tendréis por ahí barras de cristal, yo tenía la esperanza de que un vaso, una botella de vino o incluso una bombilla sirvieran como sustitutos, pero pese a todos mis intentos no es así. ¿Por qué no probar entonces con una bolsa de plástico grande o con un peine de caucho duro? También conviene tener un trozo de seda, quizá una corbata vieja o una bufanda, o una camisa hawaiana que tu pareja lleva tiempo intentando que tires a la basura. Pero si no te importa despeinarte —por la ciencia, ¿a quién podría importarle?—, puedes utilizar tu propio pelo. Tendrás que partir un papel en unos cuantos pedazos. La cantidad no importa, pero tienen que ser pequeños, del tamaño de una moneda pequeña.

Como cualquier experimento con electricidad estática, salen mucho mejor en invierno (o en el aire del desierto por la tarde), cuando el aire es seco y no húmedo. ¿Por qué? Porque el aire en sí no es conductor; de hecho, es un aislante bastante bueno. Sin embargo, si hay humedad en el aire, se puede ir perdiendo carga en un proceso complicado que no veremos aquí. En lugar de permitir que la carga se vaya

acumulando en la barra, el paño, el globo o en el pelo, el aire húmedo hace que se vayan descargando poco a poco. Por eso solo corres el riesgo de que te den calambre los pomos cuando el aire está muy seco.

La inducción invisible

Reúne todo el material y prepárate para experimentar algunas de las maravillas de la electricidad. Primero carga el peine frotándolo con fuerza contra tu pelo, que tiene que estar muy seco, o contra el trozo de seda. De las series triboeléctricas sabemos que el peine acumulará carga negativa. Párate un momento a pensar qué pasará cuando acerques el peine a los pedacitos de papel y por qué. Entendería perfectamente que dijeses «No pasará nada».

Pon el peine a unos pocos centímetros del pequeño montón de pedazos de papel. Baja el peine poco a poco y mira lo que pasa. Asombroso, ¿no? Vuelve a hacerlo; no es casualidad. Algunos de los pedazos de papel saltan hasta el peine, algunos permanecen pegados a él durante un momento y luego vuelven a caer, y otros se quedan ahí. De hecho, si juegas un poco con el peine y el papel, puedes hacer que los pedazos se mantengan erguidos e incluso bailen sobre la superficie. ¿Qué demonios está pasando? ¿Por qué algunos de los pedazos de papel se quedan pegados al peine, mientras que otros saltan, lo rozan y vuelven a caer?

Son muy buenas preguntas, con respuestas estupendas. Esto es lo que pasa: la carga negativa del peine repele los electrones en los átomos del papel, de forma que, aunque no están libres, pasan un poco más de tiempo en los átomos más alejados del peine; al hacerlo, los átomos más cercanos al peine tienen un poco más de carga positiva que antes, por tanto el filo o la parte del papel con propensión al positivo son atraídos hacia la carga negativa del peine y el papel, que es muy ligero, salta hacia él. ¿Por qué vence la fuerza de atracción a la fuerza repulsiva entre la carga negativa del peine y los electrones del papel? Porque la fuerza de la repulsión —y la de atracción— eléctrica es proporcional a la magnitud de las cargas, pero inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Es lo que se llama ley de Coulomb, en honor del físico francés Charles-Augustin de Coulomb, que hizo este importante descubrimiento. Imagino que te llamará la atención su asombroso parecido con la ley de la gravitación universal de Newton. Fíjate en que también

llamamos culombio a la unidad fundamental de carga: la unidad positiva de carga es +1 culombio (unos 6 × 1018 protones) y la de carga negativa es –1 culombio (unos 6 × 1018 electrones).

La ley de Coulomb nos dice que incluso una pequeña diferencia en la distancia entre las cargas positivas y las negativas puede tener un efecto importante. O, dicho de otro modo, la fuerza atractiva de las cargas más cercanas domina sobre la fuerza repulsiva de las cargas más alejadas.

Todo este proceso se llama inducción, ya que lo que hacemos cuando acercamos un objeto cargado a uno neutro es inducir carga en extremos del objeto neutro, creando una especie de polarización de carga en los pedazos de papel. Puedes ver varias versiones de esta pequeña demostración en mi clase para niños y para padres llamada «The Wonders of Electricity and Magnetism» («Las maravillas de la electricidad y el magnetismo») en MIT World[29], También es interesante la razón por la que algunos pedacitos de papel caen de nuevo mientras que otros se quedan pegados. Cuando un pedazo de papel toca el peine, parte del exceso de electrones del peine pasa al papel. Cuando eso sucede, quizá aún exista una fuerza eléctrica atractiva entre el peine y el pedazo de papel, pero puede que ya no sea suficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad y, por tanto, el pedazo de papel caerá. Si se transfiere mucha carga, la fuerza eléctrica puede incluso acabar siendo repulsiva, en cuyo caso tanto la fuerza gravitatoria como la eléctrica acelerarán el pedazo de papel hacia abajo.

Hincha un globo, haz un nudo en el extremo para que no se desinfle y átalo a una cuerda. Busca un sitio en tu casa donde puedas colgar el globo sin problemas. De una lámpara de techo, quizá. O puedes atar un peso a la cuerda y dejar que el globo cuelgue de la mesa de la cocina, entre 15 y 30 centímetros. Carga el peine de nuevo frotándolo con fuerza contra la seda o tu pelo (recuerda, más fricción produce una mayor carga). Acerca muy despacio el peine al globo. ¿Qué crees que va a pasar?

Pruébalo. Es bastante raro también, ¿verdad? El globo se mueve hacia el peine. Igual que con el papel, el peine ha provocado algún tipo de separación de carga en el globo (¡inducción!). ¿Qué pasará cuando alejes el peine? ¿Por qué? Sabes por

[29] Puedes encontrarla en http://mitworld.mit.edu/video/319.

intuición que el globo volverá a su posición vertical. Pero ahora ya sabes por qué, ¿no? Cuando desaparece la influencia externa, ya no hay ninguna razón para que los electrones se alejen de sus respectivos átomos. ¡Fíjate en lo que hemos sido capaces de deducir simplemente frotando un peine un poco y jugando con unos pedacitos de papel y un globo!

Hincha varios globos más. ¿Qué pasa cuando frotas uno de ellos con fuerza contra tu pelo? Eso es: tu pelo empieza a hacer cosas raras. ¿Por qué? Porque en la serie triboeléctrica el pelo humano está cerca del extremo positivo y un globo de goma está en plena zona negativa. Dicho de otro modo, la goma atrapa muchos de los electrones de tu pelo, dejándolo con carga positiva. Como cargas iguales se repelen, ¿qué puede hacer tu pelo cuando cada cabello tiene carga positiva y quiere apartarse de todos los demás con la misma carga? Tus cabellos se están repeliendo entre sí, lo que hace que se pongan de punta. Por supuesto, esto mismo sucede al quitarte un gorro de punto en invierno. Al frotarse con tu pelo, el gorro arranca muchos electrones, dejando tus cabellos cargados positivamente y deseando ponerse de punta.

Volvamos a los globos. Has frotado uno con fuerza contra tu pelo (saldría todavía mejor si lo hicieses contra una camisa de poliéster). Creo que ya sabes lo que te voy a proponer, ¿verdad? Pon el globo contra la pared o en la camisa de tu amigo. Se queda pegado. ¿Por qué? Esta es la razón: cuando frotas el globo, lo cargas; cuando lo pones contra la pared, que no es un gran conductor, los electrones que orbitan alrededor de los átomos de la pared sienten la fuerza repulsiva de la carga negativa del globo y pasan un pelín más de tiempo en la parte del átomo más alejada del globo y un poco menos en la parte más cercana a él. ¡Eso es inducción!

En otras palabras, la superficie de la pared justo donde la toca el globo adquiere una cierta carga positiva y el globo, cargado negativamente, se verá atraído hacia ella. Este resultado es muy sorprendente. ¿Por qué no se produce una transferencia de cargas, se neutralizan las dos —positiva y negativa—, haciendo que el globo se caiga de inmediato? Es una muy buena pregunta. Por un lado, el globo de goma ha acumulado unos cuantos electrones de más. En un aislante, como la goma, no se mueven de un lado a otro con facilidad, así que las cargas tienden a quedarse en su sitio. Además, no estás frotando el globo contra la pared, lo que generaría muchos

puntos de contacto, sino que simplemente está ahí, sintiendo la atracción. Pero el rozamiento también lo mantiene ahí. ¿Recuerdas la atracción del Rotor del capítulo 3? La fuerza eléctrica desempeña aquí el papel de la fuerza centrípeta en el Rotor. Y el globo puede permanecer en la pared durante un tiempo, mientras la carga va escapándose poco a poco, normalmente debido a la humedad del aire. (Si tus globos no se quedan pegados, es porque hay demasiada humedad en el aire, lo que hace que sea mejor conductor, o porque son demasiado pesados; por eso te he sugerido que fuesen finos.)

Me divierto mucho cuando hago que los globos se les queden pegados a los niños que vienen a mis conferencias. Llevo años haciéndolo en las fiestas de cumpleaños de los niños, ¡tú también puedes pasarlo bien!

La inducción funciona con todo tipo de objetos, conductores o aislantes. Puedes hacer el experimento del peine con uno de esos globos metalizados rellenos de helio que puedes comprar en los supermercados o en los bazares. Si acercas el peine al globo, sus electrones libres tienden a alejarse del peine, cargado negativamente, quedando junto al peine iones con carga positiva, que atraen el globo hacia él.

Aunque podemos cargar los globos frotándolos contra el pelo o la camisa, la goma es en realidad un aislante casi perfecto (por eso se utiliza para recubrir los cables eléctricos). La goma impide que la carga se escape de los cables hacia la humedad del aire o hacia algún objeto cercano, produciendo chispas. Evidentemente, nadie desea que salten chispas en entornos inflamables, como las paredes de su casa. La goma puede protegernos de la electricidad continuamente, y de hecho lo hace. Lo que no puede hacer, sin embargo, es protegernos de la forma más potente de energía estática que se conoce: el rayo. Por algún motivo, la gente sigue repitiendo la leyenda de que unas zapatillas o unos neumáticos de goma pueden protegernos de un rayo. No sé por qué estas ideas siguen circulando, ¡pero lo mejor es que las olvides inmediatamente! Un rayo tiene tanta potencia que no se detiene en absoluto por un trozo de goma. Puede que estés a salvo si el rayo cae en tu coche —aunque tal vez tampoco—, pero no tiene nada que ver con los neumáticos. Luego hablaré de ello.

Campos eléctricos y chispas

Antes he dicho que un rayo es simplemente una chispa grande y compleja, pero al fin y al cabo es una chispa. Te preguntarás: Pero ¿qué son las chispas? Para entenderlas tenemos que comprender algo muy importante sobre la carga eléctrica. Todas las cargas eléctricas producen campos eléctricos invisibles, de la misma manera que todas las masas producen campos gravitatorios invisibles. Puedes notar los campos eléctricos si acercas dos objetos con cargas opuestas y ves que se atraen. O si acercas objetos con cargas iguales y sientes la fuerza de repulsión; estás viendo los efectos del campo eléctrico entre los objetos.

La intensidad de ese campo se mide en unidades de voltios por metro. Sinceramente, no es fácil explicar qué es un voltio, no digamos ya los voltios por metro, pero voy a intentarlo. El voltaje de un objeto es una medida de lo que se llama potencial eléctrico. Asignamos a la Tierra un potencial eléctrico nulo; por tanto, la Tierra tendrá voltaje cero. El voltaje de un objeto con carga positiva es positivo; se define como la cantidad de energía que tengo que producir para llevar la unidad de carga positiva (+1 culombio, que es la carga de unos 6 × 1018 protones) desde la Tierra o desde cualquier conductor conectado con ella (por ejemplo, los grifos de tu casa) hasta el objeto. ¿Por qué tengo que producir energía para mover esa unidad de carga? Recuerda que, si un objeto tiene carga positiva, repelerá la unidad de carga positiva. Por tanto, tengo que generar energía (en física decimos que tengo que producir trabajo) para superar esa fuerza de repulsión. La unidad de energía es el julio. Si tengo que generar un julio de energía, entonces el potencial eléctrico de ese objeto es de +1 voltio; si tengo que generar 1.000 julios, su potencial es de +1.000 voltios. (Para la definición de un julio, véase el capítulo 9.)

¿Qué pasa si el objeto tiene carga negativa? Entonces su potencial es negativo y se define como la energía que tengo que producir para mover la unidad de carga negativa (–1 culombio, unos 6 × 1018 electrones) desde la Tierra hasta el objeto. Si esa cantidad de energía es de 150 julios, entonces el potencial eléctrico del objeto es de –150 voltios.

El voltio es, por tanto, la unidad de potencial eléctrico. Debe su nombre al físico italiano Alessandro Volta, que en 1800 fabricó la primera pila eléctrica, que ahora llamamos batería. Fíjate en que el voltio no es una unidad de energía, sino de

energía por unidad de carga (julio/culombio).

Una corriente eléctrica circula entre un potencial eléctrico alto y uno bajo. La intensidad de la corriente depende de la diferencia de potencial y de la resistencia eléctrica entre los dos objetos. Los aislantes tienen una resistencia muy alta; los metales, una resistencia baja. Cuanto mayor es la diferencia de voltaje y menor es la resistencia, mayor es la corriente eléctrica resultante. La diferencia de potencial entre los dos pequeños agujeros en los enchufes de pared en Estados Unidos es de 120 voltios (en Europa es de 220 voltios); la corriente de los enchufes es alterna (lo veremos en el capítulo siguiente). La unidad de corriente es el amperio, llamado así en honor del matemático y físico francés André-Marie Ampère. Si la corriente en un cable es de un amperio, significa que por cualquier punto del cable pasa una carga de un culombio por segundo.

¿Qué pasa con las chispas? ¿Cómo ayuda todo esto a explicarlas? Si has arrastrado mucho los zapatos por la alfombra, puede que hayas creado una diferencia de potencial de hasta unos 30.000 voltios con la Tierra o con el pomo de la puerta de metal que tienes a 6 metros de distancia. Es decir, 30.000 voltios en una distancia de 6 metros, 5.000 voltios por metro. Si te acercas al pomo, la diferencia de potencial se mantiene pero la distancia disminuye, por lo que aumenta la intensidad del campo eléctrico. Cuando estés a punto de tocar el pomo será de 30.000 voltios en un centímetro, es decir, unos 3 millones de voltios por metro.

Con un valor tan alto del campo eléctrico (en aire seco a una atmósfera) se produce lo que se conoce como ruptura dieléctrica. Los electrones atraviesan espontáneamente la separación de un centímetro y al hacerlo ionizan el aire, lo que a su vez provoca que más electrones den el salto, resultando en una avalancha y produciendo una chispa. La corriente eléctrica atraviesa el aire hasta tu dedo antes de que llegues a tocar el pomo. Imagino que te habrás estremecido un poco, recordando la última vez que sentiste uno de esos agradables calambres. El dolor que sientes cuando salta una chispa se debe a que la corriente eléctrica hace que tus nervios se contraigan de forma rápida y desagradable.

¿A qué se debe el ruido, ese chisporroteo cuando te da un calambre? Es fácil de explicar: la corriente eléctrica calienta el aire muy rápido, lo que produce una pequeña onda de presión, una onda sonora, que es lo que oímos. Pero las chispas

también producen luz, aunque a veces durante el día no la veas. Entender cómo se produce esta luz es un poco más complicado. Surge cuando los iones creados en el aire se recombinan con los electrones y emiten parte de la energía liberada en forma de luz. Aunque no puedas ver la luz de las chispas (porque no estás frente a un espejo en una habitación a oscuras), sí puedes oír sus chisporroteos al cepillarte el pelo cuando el aire es muy seco.

Imagínatelo: sin mucho esfuerzo, al cepillarte el pelo o al quitarte la camisa de poliéster has creado, en las puntas de tu pelo y en la superficie de la camisa, campos eléctricos de unos 3 millones de voltios por metro. Así que si te acercas al pomo y sientes una chispa a, pongamos, 3 milímetros, tu diferencia de potencial con el pomo es de unos 10.000 voltios.

Puede parecer mucho, pero casi toda la electricidad estática no es nada peligrosa, sobre todo porque, incluso a voltajes muy altos, la corriente (el número de cargas que te atraviesan en un período de tiempo determinado) es muy pequeña. Si no te importa sentir unas pequeñas sacudidas, puedes hacer experimentos con los calambres y pasar un rato divertido mientras haces demostraciones de física. Sin embargo, nunca acerques nada metálico a los enchufes de tu casa. Eso sí que puede ser muy peligroso, ¡incluso puede poner en peligro tu vida!

Prueba a cargarte frotando tu piel con poliéster (llevando zapatos con suela de goma o sandalias, para que la carga no se escape hacia el suelo). Apaga la luz y acerca lentamente el dedo a una lámpara de metal o a un pomo. Antes de que lo toques, deberías ver cómo salta la chispa en el aire entre el metal y tu dedo. Cuanto más te cargues, mayor será la diferencia de potencial que crearás respecto al pomo, más fuerte será el chispazo y mayor el ruido.

Uno de mis alumnos se estaba cargando continuamente sin querer. Me contó que tenía un albornoz de poliéster que solo usaba en invierno, lo cual resultó ser una mala elección, porque cada vez que se lo quitaba se cargaba y después se llevaba un calambre al encender la lamparilla de noche. Resulta que la piel humana es uno de los materiales más positivos de la serie triboeléctrica y el poliéster uno de los más negativos. Por eso, para ver cómo saltan chispas frente al espejo en una habitación a oscuras lo mejor es utilizar una camisa de poliéster, pero no un albornoz.

Para demostrar de una forma bastante espectacular (y muy divertida) cómo se carga la gente, invito a un alumno que lleva una chaqueta de poliéster a que se siente frente a la clase en una silla de plástico (el plástico es muy buen aislante). Entonces, de pie sobre un una peana de plástico para aislarme del suelo, empiezo a golpear al alumno con una piel de gato. Entre risas de los alumnos, sigo haciéndolo durante alrededor de medio minuto. Debido a la conservación de la carga, el alumno y yo acumularemos cargas opuestas y entre nosotros se creará una diferencia de potencial. Muestro a la clase el tubo de neón que sostengo por un extremo. Apagamos las luces de la sala y, a oscuras, toco al alumno con el otro extremo del tubo ¡y se ve un fogonazo de luz (ambos sentimos una descarga eléctrica)! La diferencia de potencial entre los dos ha debido de ser de al menos 30.000 voltios. La corriente que nos ha atravesado a nosotros y el tubo de neón nos ha descargado. La demostración es graciosísima y muy efectiva.

En el vídeo «Professor Beats Student» («Profesor golpea a alumno»), en YouTube, se puede ver la parte en la que golpeo al alumno de mi clase[30].

Para seguir explorando los misterios del potencial eléctrico utilizo un aparato asombroso llamado generador de Van de Graaff, que parece ser simplemente una esfera de metal montada sobre una columna cilíndrica. En realidad, es un ingenioso aparato para producir enormes diferencias de potencial (en clase llego a unos 300.000 voltios, pero pueden ser mucho más altas). Si echas un vistazo a las seis primeras clases de mi curso sobre Electricidad y Magnetismo (8.02) en la web, verás algunas de las divertidísimas demostraciones que puedo hacer con el Van de Graaff. Verás que provoco una ruptura de dieléctrico, con chispas enormes entre la gran cúpula del Van de Graaff y la bola más pequeña conectada a tierra. Verás que un campo eléctrico invisible es capaz de encender un tubo fluorescente y que «se apaga» si el tubo se coloca perpendicular al campo. Incluso podrás ver que en la más absoluta oscuridad toco (brevemente) un extremo del tubo, cerrando el circuito con el suelo, y que la luz brilla aún más. Suelto alguna lágrima, porque la descarga es bastante fuerte, aunque no es peligrosa en absoluto. Y si quieres llevarte una verdadera sorpresa (igual que mis alumnos), mira lo que pasa al final de la clase 6, cuando demuestro el método realmente llamativo que utilizaba Napoleón para

[30] www.youtube.com/watch?v=P4XZ-hMHNuc.

buscar biogás[31].

Por suerte, un alto voltaje por sí solo no supone un riesgo mortal, ni siquiera hay riesgo de hacerse daño. Lo importante es la corriente que circula por tu cuerpo. La corriente es la cantidad de carga por unidad de tiempo y, como ya he dicho antes, se mide en amperios. Es la corriente la que puede hacerte daño e incluso matarte, sobre todo si es continua. ¿Por qué es peligrosa? Sobre todo, porque las cargas, al atravesar tu cuerpo, provocan la contracción de los músculos. A niveles sumamente bajos, hacen que tus músculos y nervios se contraigan hasta crisparse de forma incontrolada y dolorosa; a niveles más altos, hacen que tu corazón deje de latir.

Por eso, una de las partes más oscuras de la historia de la electricidad y el cuerpo humano es su utilización para torturar —ya que puede provocar un dolor insoportable— y matar, como en el caso de la silla eléctrica. Si has visto la película Slumdog Millionaire quizá recuerdes las horribles escenas de tortura en la comisaría, en las que los brutales policías le ponían electrodos al joven Jamal, haciendo que su cuerpo se retorciese violentamente.

A niveles más bajos, la corriente puede incluso ser saludable. Si alguna vez has recibido fisioterapia en la espalda o en el hombro, puede que hayas probado lo que los terapeutas llaman «estimulación eléctrica». Los terapeutas aplican en la zona afectada almohadillas conectadas a una fuente de energía eléctrica y aumentan la corriente gradualmente, provocando la contracción-relajación del músculo.

La electricidad también se utiliza en intentos de salvación más espectaculares. Todos habréis visto los programas de televisión en los que alguien utiliza unas almohadillas eléctricas, llamadas desfibriladores, para intentar regularizar el ritmo cardíaco de un paciente con problemas de corazón. Durante la operación de corazón a la que me sometí el año pasado, cuando entré en parada cardíaca, los médicos utilizaron desfibriladores para intentar que mi corazón volviera a latir, ¡y funcionaron! Sin los desfibriladores, Por amor a la física nunca habría visto la luz del día.

La gente no se pone de acuerdo sobre la cantidad exacta de corriente que es letal. La razón es obvia: no se hacen muchos experimentos con niveles peligrosos de corriente. Además, hay una gran diferencia entre que la corriente te atraviese una

[31] La URL es http://ocw.mit.edu/courses/physics/ 8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/video-lectures/.

mano o que pase por tu cerebro o tu corazón. Puede que en tu mano solo produjese una quemadura, pero prácticamente todo el mundo está de acuerdo en que una corriente algo mayor de una décima de amperio, aunque dure menos de un segundo, puede resultar fatal si te atraviesa el corazón. Las sillas eléctricas al parecer utilizaban alrededor de 2.000 voltios y entre 5 y 12 amperios.

¿Recuerdas que de niño te decían que no utilizases un cuchillo para sacar el pan de la tostadora, porque podías electrocutarte? ¿Es eso cierto? Acabo de mirar los rangos de corriente de tres aparatos en mi casa: una radio (0,5 amperios), la tostadora (7 A) y la máquina de café (7 A). Puedes ver esta información en las etiquetas que la mayoría de los aparatos llevan en su base. En algunas no figura la intensidad en amperios, pero siempre se puede calcular dividiendo la potencia del aparato, en vatios, entre el voltaje, normalmente de 120 voltios en Estados Unidos. La mayoría de los fusibles en mi casa funcionan en el rango entre 15 y 20 amperios. Lo realmente importante no es que los aparatos consuman 1 o 10 amperios, sino que evites provocar accidentalmente un cortocircuito y, sobre todo, que evites tocar sin querer los 120 voltios con un objeto metálico; si lo hicieses al salir de la ducha, podría matarte. ¿Cuál es el resumen de todo esto? Simplemente, que tu madre tenía razón cuando te decía que no metieses un cuchillo en la tostadora cuando estaba enchufada. Si alguna vez quieres reparar algún aparato eléctrico, asegúrate de haberlo desenchufado antes. Nunca olvides que la corriente puede ser muy peligrosa.

Chispas celestiales

Obviamente, uno de los tipos de corriente más peligrosos es el rayo, que es también uno de los fenómenos eléctricos más extraordinarios. Es a la vez potente, no del todo predecible, muy poco comprendido y enigmático. En la mitología, de los griegos a los mayas, los rayos han sido símbolos o armas de las divinidades, cosa que no nos sorprende. De media, cada año en la Tierra hay unos 16 millones de tormentas eléctricas, más de 43.000 al día, unas 1.800 cada hora, que producen unos 100 rayos por segundo, es decir, más de 8 millones al día, en todo el planeta.

El rayo se produce cuando las nubes de tormenta se cargan eléctricamente. Normalmente, la parte superior de la nube se carga positivamente y la parte inferior

acumula carga negativa. No se sabe del todo por qué es así. Aunque no lo creas, aún nos queda mucho por aprender sobre la física de la atmósfera. De momento, simplificaremos la situación e imaginaremos una nube cuya carga negativa está en la parte más cercana a la Tierra. Debido a la inducción, el suelo más cercano a la nube acumulará carga positiva, generando un campo eléctrico entre la Tierra y la nube.

La física de un rayo es bastante complicada, pero en resumen un rayo (una ruptura dieléctrica) sucede cuando la diferencia de potencial eléctrico entre la nube y la Tierra alcanza las decenas de millones de voltios. Y, aunque parece que el rayo sale de la nube hacia la Tierra, en realidad sale tanto desde la nube como desde la Tierra. Las corrientes eléctricas durante un rayo medio son de unos 50.000 amperios (aunque pueden alcanzar unos pocos cientos de miles de amperios). La potencia máxima durante un rayo medio es de un billón (1012) de vatios. Sin embargo, esto solo dura unas pocas decenas de microsegundos. Por tanto, la energía total que se libera en un rayo rara vez supera unos pocos centenares de millones de julios, lo que equivale a la energía que una bombilla de 100 vatios consume en un mes. Aprovechar la energía de los rayos, por tanto, no solo es poco viable, sino que tampoco es demasiado útil.

Casi todos sabemos que podemos deducir a qué distancia ha caído un rayo por el tiempo que transcurre entre cuando lo vemos y cuando oímos el trueno. Pero el motivo por el que esto es así nos permite vislumbrar las poderosas fuerzas que intervienen en este fenómeno. No tiene nada que ver con la explicación que una vez le escuché a un alumno: que el rayo provoca algún tipo de área de baja presión y que el trueno se produce cuando el aire que va a rellenar la brecha choca con el aire del otro lado. De hecho, es casi completamente al revés. La energía del rayo calienta el aire hasta unos 20.000 grados Celsius, más de tres veces la temperatura en la superficie del Sol. Este aire supercaliente crea una potente onda de presión que golpea el aire más frío que hay a su alrededor, provocando ondas sonoras que viajan por el aire. Como las ondas sonoras recorren algo más de un kilómetro en tres segundos, contando los segundos puedes deducir fácilmente a qué distancia ha caído el rayo.

El hecho de que el rayo caliente el aire tantísimo explica también otro fenómeno

que quizá hayas experimentado durante una tormenta. ¿Has notado alguna vez el olor particular que hay en el aire tras una tormenta en el campo, una especie de frescura, casi como si la tormenta hubiese limpiado el aire? Es difícil olerlo en la ciudad, porque siempre hay mucho humo de los coches. Pero incluso si has experimentado esa fragancia maravillosa —y si no es así, te recomiendo que prestes atención la próxima vez que estés al aire libre justo tras una tormenta—, seguro que no sabías que es el olor del ozono, una molécula formada por tres átomos de oxígeno. Las moléculas de oxígeno normales, inodoras, están compuestas por dos átomos de oxígeno, y se representan como O2. Pero el enorme calor de la descarga del rayo rompe las moléculas de oxígeno (no todas, pero sí las suficientes) y los átomos individuales, inestables por sí solos, se unen a moléculas normales de O2, creando O3, ozono.

Aunque el ozono en bajas cantidades huele muy bien, en concentraciones más altas no es tan agradable. Puedes encontrarlo normalmente bajo las líneas eléctricas de alta tensión. Si oyes un zumbido proveniente de las líneas, en general significa que se están produciendo chispas, lo que se llama una descarga de corona, y que por tanto se está creando ozono.

Volvamos ahora a la idea de que puedes sobrevivir a un rayo si llevas zapatillas de deporte. Con zapatillas o sin ellas, un rayo de entre 50.000 y 100.000 amperios, capaz de calentar el aire a más de tres veces la temperatura de la superficie del Sol, con toda seguridad te achicharraría, haría que te sacudieses en una convulsión eléctrica o que explotases, al transformar instantáneamente toda el agua de tu cuerpo en vapor supercaliente. Es lo que les pasa a los árboles: la savia estalla y hace que la corteza salga disparada por los aires. Cien millones de julios de energía —el equivalente a más de 20 kilos de dinamita— no son poca cosa.

En cuanto a si los neumáticos de goma hacen que estés seguro dentro del coche cuando cae un rayo, puede que sí —¡no hay garantías!—, pero por un motivo muy distinto. La corriente eléctrica circula por la parte exterior de los materiales conductores, un fenómeno llamado efecto pelicular, y en un coche estás en realidad sentado dentro de una caja metálica, un buen conductor. Puede incluso que no te pase nada si tocas el interior del conducto de ventilación del salpicadero. Sin embargo, te aconsejo vivamente que no lo hagas; es muy peligroso, porque la

mayoría de los coches actuales tienen partes de fibra de vidrio, que no presenta el efecto pelicular. Dicho de otro modo, si cae un rayo sobre el coche, tú —y tu coche— podéis pasar un rato muy desagradable. Quizá quieras echarle un vistazo a este breve vídeo de cómo un rayo cae sobre un coche y a las fotos de una furgoneta tras caerle otro rayo en www.weatherimagery.com/blog/rubber-tires-protect-lightning/ y www.prazen.com/cori/van.html. ¡Queda claro que con esto no se juega!

Por suerte para todos, la situación es muy diferente para los aviones comerciales. De media, les cae un rayo más de una vez al año, pero sobreviven felizmente gracias al efecto pelicular[32].

Otro experimento relacionado con los rayos que conviene no hacer es el que se le atribuye popularmente a Benjamin Franklin: volar una cometa durante una tormenta con una llave colgando de ella. Supuestamente, Franklin quería comprobar la hipótesis de que las tormentas creaban fuego eléctrico. Según su razonamiento, si el rayo era realmente una fuente de electricidad, cuando la cuerda de su cometa se mojase con la lluvia se convertiría en un buen conductor de esa electricidad (aunque él no utilizaba esta palabra), que llegaría a la llave en el extremo de la cuerda. Si acercase la mano a la llave, debería notar una chispa. Como sucede con la afirmación de Newton al final de su vida de que la inspiración le había venido al ver cómo caía una manzana de un árbol, no hay ninguna prueba de la época de que Franklin realizase alguna vez este experimento, solo una descripción en una carta enviada a la Royal Society de Inglaterra y otra escrita quince años después por su amigo Joseph Priestley, el descubridor del oxígeno.

Hiciese o no Franklin el experimento —que habría sido muy peligroso, probablemente mortal—, lo que sí hizo fue publicar una descripción de otro experimento diseñado para atraer un rayo hacia el suelo, colocando una larga barra de hierro sobre una torre o un campanario. Unos años más tarde, el francés Thomas-François Dalibard, que había conocido a Franklin y había traducido su propuesta al francés, llevó a cabo una versión del experimento ligeramente diferente, y vivió para contarlo. Lo consiguió con una barra vertical de hierro de más de diez metros y pudo ver chispas en la base de la barra, que no estaba conectada a tierra.

---

[32] Mira este vídeo: www.youtube.com/watch?v=036hpBvjoQw.

Inspirado claramente por el experimento de Dalibard, el profesor Georg Wilhelm Richmann, un eminente científico nacido en Estonia que había estudiado en profundidad los fenómenos eléctricos y que entonces vivía en la ciudad rusa de San Petersburgo, decidió intentarlo. Según el fascinante libro de Michael Brian Schiffer Draw the Lightning Down: Benjamin Franklin and Electrical Technology in the Age of Enlightenment, colocó una barra de metal sobre el tejado de su casa y la conectó mediante una cadena de latón a un aparato para medir la electricidad en su laboratorio, en el primer piso.

Quiso la suerte —o el destino— que se produjese una tormenta durante una reunión de la Academia de Ciencias en agosto de 1753. Richmann volvió corriendo a casa, acompañado del artista que iba a ilustrar su nuevo libro. Mientras observaba su equipo, cayó un rayo, pasó por la barra y por la cadena, y recorrió unos 30 centímetros en el aire hasta la cabeza de Richmann, lo electrocutó y lo lanzó al otro lado de la habitación, dejando también inconsciente al artista. Puedes ver varias ilustraciones de la escena en internet, aunque no está claro si son creaciones del artista en cuestión.

Franklin inventaría un artilugio similar, pero conectado a tierra; conocido hoy como pararrayos. Consigue atraer los rayos hacia el suelo, pero no por las razones que Franklin suponía. Él pensó que el pararrayos induciría una descarga continua entre la nube cargada y el edificio, manteniendo así baja la diferencia de potencial y eliminando el peligro del rayo. Confiaba hasta tal punto en esta idea que aconsejó al rey Jorge II que pusiese estas barras puntiagudas en el palacio real y sobre los depósitos de munición. Quienes se oponían a Franklin afirmaban que lo único que haría el pararrayos sería atraer el rayo, y que el efecto de reducción de la diferencia de potencial entre el edificio y las nubes de tormenta sería insignificante. La historia cuenta que el rey confió en Franklin e instaló los pararrayos.

Poco después, un rayo cayó sobre uno de los depósitos de munición y produjo muy pocos daños. El pararrayos funcionó, pero por razones completamente distintas. Los críticos de Franklin tenían razón: los pararrayos atraen los rayos y la descarga en la barra de hecho es insignificante comparada con la enorme carga de la nube. Pero funciona porque, si tiene el grosor suficiente para soportar entre 10.000 y 100.000 amperios, la corriente queda confinada en la barra y la carga se transfiere a tierra.

¡Franklin no solo era brillante, sino también afortunado!

¿No te parece extraordinario cómo, si entendemos los pequeños chisporroteos al quitarnos una sudadera en invierno, también podemos llegar a entender hasta cierto punto las enormes tormentas eléctricas que pueden iluminar todo el cielo nocturno, así como el origen de uno de los sonidos más potentes y aterradores de la naturaleza?

En cierto sentido, seguimos siendo versiones actualizadas de Benjamin Franklin, tratando de entender fenómenos que escapan a nuestra comprensión. A finales de la década de 1980, los científicos fotografiaron por primera vez unos tipos de rayos que se producen muy por encima de las nubes. Unos son los duendes rojos, que consisten en descargas de un color naranja rojizo a entre 50 y 90 kilómetros por encima de la superficie terrestre. Y también están los chorros azules, mucho mayores, que alcanzan los 70 kilómetros de longitud, llegando a la atmósfera superior. Como solo sabemos de su existencia desde hace poco más de veinte años, hay muchas cosas que aún no conocemos sobre las causas de estos extraordinarios fenómenos. A pesar de todo lo que sabemos sobre la electricidad, en cada tormenta, unas 45.000 veces al día, se producen verdaderos misterios.

Capítulo 8
Los misterios del magnetismo

A la mayoría de nosotros, los imanes nos parecen simplemente divertidos, en parte porque ejercen fuerzas que podemos sentir y con las que podemos jugar, pero que son completamente invisibles. Cuando acercamos dos imanes, se atraen o se repelen, de forma muy parecida a como lo hacen dos objetos cargados. Pensamos que el magnetismo está estrechamente relacionado con la electricidad —casi todos los interesados en la ciencia conocen la palabra electromagnético, por ejemplo—, pero somos asimismo incapaces de explicar por qué o cómo están relacionados. Es un asunto vastísimo, al que dedico todo un curso introductorio, pero aquí nos quedaremos en la superficie. Aun así, la física del magnetismo enseguida puede conducirnos a conocer efectos alucinantes y a entenderlos en un sentido profundo.

Las maravillas de los campos magnéticos

Si coges un imán y lo pones frente a una televisión encendida de las antiguas (no de las planas), verás en la pantalla unas formas y colores muy llamativos. En la época anterior a las pantallas planas de cristal líquido (LCD: liquid crystal display) o de plasma, los haces de electrones disparados hacia la pantalla desde la parte posterior del televisor estimulaban los colores, dibujando en realidad la imagen en la pantalla. Cuando acercas un imán potente a una de estas pantallas, como hago en clase, crea formas de lo más psicodélicas. Son tan llamativas que les encantan incluso a los niños de cuatro o cinco años. (Es fácil encontrar imágenes de estas formas en internet.)

De hecho, parece que es muy habitual que los niños lo descubran por su cuenta: en internet hay un montón de padres preocupados, pidiendo ayuda para arreglar sus televisores porque sus hijos han pasado los imanes de la nevera por las pantallas. Por suerte, la mayoría de los televisores llevan un dispositivo que desmagnetiza la pantalla y normalmente el problema desaparece al cabo de unos pocos días o semanas. Pero si no es así, tendrás que llamar a un técnico para que te lo solucione. Así que no te recomiendo que acerques un imán a tu televisor (o al monitor del ordenador), a menos que se trate de un televisor o un monitor antiguos

que no vayas a usar, en cuyo caso puede ser divertido. El famoso artista coreano Nam June Paik ha creado muchas obras de arte al distorsionar vídeos de una forma parecida. En clase, enciendo el televisor, elijo un programa particularmente horrible —los anuncios son fantásticos para esta demostración— y todos disfrutan viendo cómo el imán distorsiona completamente la imagen.

Como sucede con la electricidad, la historia del magnetismo se remonta a la Antigüedad. Al parecer, hace más de dos mil años, los griegos, los indios y los chinos ya sabían que un determinado tipo de piedras —que se acabarían denominando piedras imán— atraían pequeños trozos de hierro (igual que los griegos habían descubierto que al frotar ámbar se le pegaban pequeños pedazos de hojas). Hoy esa sustancia se conoce como magnetita, un mineral magnético que se encuentra en la naturaleza, de hecho el material más magnético de los que existen en la Tierra de forma natural. La magnetita es una combinación de hierro y oxígeno (Fe_3O_4), por lo que se trata de un óxido de hierro.

Pero hay muchos más tipos de imanes además de la magnetita. El hierro ha sido muy importante en la historia del magnetismo, y sigue siendo un componente tan importante en muchos de los materiales sensibles al magnetismo que los materiales que son atraídos con más fuerza por los imanes se llaman ferromagnéticos («ferro» es un prefijo que significa hierro). Suelen ser metales o compuestos metálicos: el propio hierro, desde luego, pero también el cobalto, el níquel y el dióxido de cromo (que se usaba mucho en las cintas magnéticas). Algunos de estos materiales pueden magnetizarse permanentemente al someterlos a un campo magnético. Otros, llamados paramagnéticos, se vuelven débilmente magnéticos cuando se someten a un campo y vuelven a su estado no magnético si el campo desaparece. Entre estos materiales están el aluminio, el tungsteno, el magnesio y, aunque no lo creas, el oxígeno. Y aun hay otros materiales, llamados diamagnéticos, en los que se crean campos magnéticos débiles que se oponen al campo que los provoca. Dentro de esta categoría se incluyen el bismuto, el cobre, el oro, el mercurio, el hidrógeno y la sal común, así como la madera, los plásticos, el alcohol, el aire y el agua. (Lo que hace que los materiales sean ferromagnéticos, paramagnéticos o diamagnéticos es la distribución de los electrones alrededor del núcleo, una cuestión muy complicada para verla en detalle aquí.)

Existen incluso imanes líquidos, que no son exactamente líquidos ferromagnéticos sino disoluciones de materiales ferromagnéticos que responden a los imanes de maneras muy hermosas y sorprendentes. Es bastante fácil producir un líquido magnético[33]. Si pones esta disolución, que es bastante densa, sobre un cristal y colocas un imán debajo, observarás algo notable, mucho más interesante que ver cómo unas virutas de hierro se orientan según las líneas del campo magnético, como verías en secundaria.

Al parecer, en el siglo XI los chinos imantaron agujas tocándolas con magnetita y colgándolas de hilos de seda. Las agujas se orientaban en la dirección norte-sur, alineándose con las líneas del campo magnético terrestre. Un siglo más tarde, se usaban brújulas para la navegación tanto en China como en sitios tan alejados de allí como el canal de la Mancha. Estas brújulas estaban compuestas por una aguja imantada que flotaba en un cuenco con agua. Ingenioso, ¿verdad? Independientemente de hacia dónde girase el barco, y el cuenco con él, la aguja seguiría apuntando en la dirección norte-sur.

La naturaleza es todavía más ingeniosa. Sabemos ahora que los cuerpos de las aves migratorias contienen pequeños trozos de magnetita que aparentemente utilizan como brújulas internas para guiarse en sus migraciones. Algunos biólogos creen incluso que el campo magnético terrestre estimula los centros ópticos de algunas aves y otros animales, como las salamandras, lo que parece indicar que, de alguna forma, estos animales pueden «ver» el campo magnético terrestre. ¿No te parece estupendo?

En 1600, el notable médico y científico William Gilbert —que no era un médico cualquiera, sino el de la reina Isabel I— publicó su libro De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure, en el que afirmaba que la propia Tierra era un imán, según dedujo de sus experimentos con una terrela, una pequeña esfera de magnetita diseñada como modelo a escala de la Tierra. Era algo más grande que un pomelo y, cuando se colocaba una brújula sobre ella, se comportaba como lo hace sobre la superficie terrestre. Gilbert afirmó que las brújulas señalaban hacia el norte porque la Tierra era un imán y no, como algunos pensaban, porque

---

[33] aquí puedes encontrar las instrucciones para hacerlo: http://chemistry.about.com/od/demonstrationsexperiments/ss/liquidmagnet.htm

hubiese islas magnéticas en los polos Norte y Sur, o porque las brújulas apuntaban hacia Polaris, la Estrella Polar.

Gilbert no solo estaba en lo cierto respecto a la existencia del campo magnético terrestre, sino que este tiene incluso polos magnéticos (como los polos de un imán de nevera), que no coinciden del todo con los polos Norte y Sur geográficos. No solo eso, sino que estos polos se desplazan ligeramente, alrededor de unos 15 kilómetros al año. Así que, en algunos aspectos la Tierra se comporta como un sencillo imán de barra —una pieza de metal imantada normal y corriente, que se puede comprar en una tienda de modelismo—, pero en otros es completamente diferente. Los científicos han tardado mucho tiempo en desarrollar una teoría plausible que explique por qué la Tierra posee un campo magnético. No basta con saber que el núcleo terrestre contiene una gran cantidad de hierro, ya que a partir de cierta temperatura (llamada temperatura de Curie) los materiales, incluido el hierro, pierden sus propiedades ferromagnéticas: su temperatura de Curie es de unos 770 grados Celsius, ¡y sabemos que el núcleo está muchísimo más caliente!

La teoría es bastante complicada y se basa en las corrientes eléctricas que circulan por el núcleo terrestre y en la rotación de la Tierra (los físicos lo llaman efecto dinamo). (Los astrofísicos utilizan la teoría de estos efectos dinamo para explicar los campos magnéticos de las estrellas, incluido el del Sol, cuyo campo se invierte por completo cada once años, aproximadamente.) Puede que te sorprenda, pero los científicos aún siguen trabajando en un modelo matemático completo de la Tierra y su campo magnético, lo que da una idea de la complejidad del asunto. Su trabajo se complica aún más por el hecho de que existen pruebas geológicas de que el campo magnético terrestre ha cambiado radicalmente a lo largo de los milenios: los polos se han movido mucho más allá de su desplazamiento anual, y parece que el campo magnético también se ha invertido más de ciento cincuenta veces solo en los últimos 70 millones de años. Sorprendente, ¿no?

Actualmente disponemos de mapas bastante precisos del campo magnético terrestre, gracias a satélites (como el Ørsted danés) equipados con sensibles magnetómetros. Por eso sabemos que el campo magnético tiene un alcance de más de un millón de kilómetros en el espacio. También sabemos que, más cerca de la Tierra, el campo magnético produce uno de los fenómenos naturales más hermosos

en la atmósfera.

El Sol, como recordarás, emite un gran chorro de partículas cargadas, sobre todo protones y electrones, conocido como viento solar. El campo magnético terrestre atrae algunas de estas partículas hacia nuestra atmósfera en los polos magnéticos. Cuando estas partículas, moviéndose con velocidades medias de unos 400 kilómetros por segundo, chocan con las moléculas de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera, parte de su energía cinética (energía del movimiento) se transforma en energía electromagnética en forma de luz (el oxígeno emite luz verde o roja y el nitrógeno azul o roja). Supongo que ya te imaginas hacia dónde voy. En efecto, esto es lo que produce el espléndido espectáculo luminoso conocido en el hemisferio norte como aurora boreal y en el sur como aurora austral. ¿Por qué solo se ven estas luces muy al norte o muy al sur? Porque la mayor parte del viento solar entra en la atmósfera terrestre cerca de los polos magnéticos, donde el campo magnético es más fuerte. La intensidad de estos efectos varía de unas noches a otras, en función de cuándo se producen las erupciones solares que hacen que aumente la presencia de las partículas que dan lugar al espectáculo. Cuando se dan gigantescas erupciones solares, estos efectos pueden ser enormes, provocando lo que se denominan tormentas geomagnéticas y produciendo auroras visibles mucho más allá de las zonas normales, interfiriendo a veces con las transmisiones de radio y con el funcionamiento de los ordenadores o de los satélites, llegando incluso a causar apagones.

Si no vives cerca del círculo polar ártico (o antártico), no verás estas auroras muy a menudo. Por eso, si alguna vez coges un vuelo nocturno a Europa desde el nordeste de Estados Unidos (la mayoría de los vuelos lo son), puede que quieras sentarte en la parte izquierda del avión. Como estarás a más de 11.000 metros de altura, quizá veas la aurora boreal desde tu ventana, sobre todo si el Sol ha estado especialmente activo poco tiempo antes. Yo las he visto muchas veces, por eso siempre que puedo me siento en la parte izquierda del avión. Me digo: las películas las puedo ver en casa en cualquier momento, así que en los aviones trato de ver la aurora boreal por las noches y las glorias durante el día.

Tenemos una gran deuda con el campo magnético terrestre, porque, de no ser por él, puede que el constante bombardeo de partículas cargadas sobre nuestra

atmósfera hubiese tenido consecuencias graves. El viento solar bien podría haber bombardeado la atmósfera y los océanos hace millones de años, creando unas condiciones que habrían hecho mucho más difícil, cuando no imposible, el desarrollo de la vida. Los científicos creen que es precisamente este bombardeo del viento solar, unido al débil campo magnético de Marte, la razón de que apenas haya agua en el planeta rojo y de que su atmósfera sea tan fina, dando lugar a un ambiente en el que los seres humanos solo podrían vivir con la ayuda de potentes sistemas de soporte vital.

El misterio del electromagnetismo

En el siglo XVIII, varios científicos empezaron a sospechar que la electricidad y el magnetismo estaban de alguna forma relacionados, mientras que otros, como el inglés Thomas Young y el francés André-Marie Ampère, creían que una no tenía nada que ver con el otro. William Gilbert pensaba que la electricidad y el magnetismo eran fenómenos completamente separados, pero no obstante los estudió simultáneamente y también escribió sobre la electricidad en De magnete. Llamó «fuerza eléctrica» a la fuerza atractiva del ámbar al frotarlo (recuerda que el término griego para el ámbar era elektron). E incluso inventó una versión del electroscopio, la manera más sencilla de medir la electricidad estática y demostrar así su existencia. (Un electroscopio tiene un puñado de cintas de oropel en el extremo de una barra de metal. En cuanto se carga, las cintas se separan unas de las otras: el equivalente de laboratorio del pelo de punta.)

La Academia de Ciencias de Baviera solicitó en 1776 y 1777 artículos sobre la relación entre la electricidad y el magnetismo. La gente sabía desde hacía un tiempo que las descargas de los rayos hacían que las brújulas se volviesen locas, y el propio Benjamin Franklin había imantado agujas al utilizarlas para descargar botellas de Leiden. (Inventadas en los Países Bajos a mediados de siglo, las botellas de Leiden podían almacenar cargas eléctricas. Fueron una de las primeras versiones de lo que ahora llamamos condensador.) Pero, aunque a principios del siglo XIX se estaban llevando a cabo múltiples estudios sobre la electricidad, ningún científico vinculó claramente la corriente eléctrica con el magnetismo hasta que el físico danés Hans Christian Ørsted (nacido en 1777) hizo un descubrimiento absolutamente

crucial que unió la electricidad y el magnetismo. Según el historiador Frederick Gregory, este fue probablemente el único momento en la historia de la física moderna en que un descubrimiento tan enorme tuvo lugar frente a una clase llena de alumnos.

En 1820, Ørsted se dio cuenta de que una corriente eléctrica que fluía por un cable conectado a una batería afectaba a la aguja de una brújula cercana, haciendo que girase en dirección perpendicular al cable, separándola de la dirección del norte y sur magnéticos. Cuando desconectó el cable, cortando el flujo de corriente, la aguja volvió a la normalidad. No está del todo claro si Ørsted estaba haciendo el experimento intencionadamente como parte de una clase o si la brújula estaba al lado por casualidad y simplemente observó el sorprendente efecto. Sus propios relatos del episodio difieren (como hemos visto más de una vez en la historia de la física).

Ya fuese por accidente o a propósito, este puede haber sido el experimento (llamémoslo así) más importante que haya hecho un físico en toda la historia. Dedujo razonablemente que la corriente que circulaba por el cable producía un campo magnético, y que la aguja magnética de la brújula se movía en respuesta a él. Este magnífico descubrimiento desencadenó una oleada de investigaciones sobre la electricidad y el magnetismo en el siglo XIX, destacando las realizadas por André-Marie Ampère, Michael Faraday, Carl Friedrich Gauss y, por último, el imponente trabajo teórico de James Clerk Maxwell.

Como la corriente consiste en cargas eléctricas en movimiento, Ørsted había demostrado que estas crean un campo magnético. En 1831, Michael Faraday descubrió que si movía un imán a través de una bobina de cable conductor producía una corriente en ella. De hecho, probó que lo que Ørsted había demostrado —que las corrientes eléctricas generan un campo magnético— podía invertirse: un campo magnético en movimiento también produce corrientes eléctricas. Pero ni los resultados de Ørsted ni los de Faraday tenían sentido intuitivamente, ¿verdad? Si mueves un imán cerca de una bobina conductora —el cobre funciona muy bien porque su conductividad es muy alta—, ¿por qué demonios habrías de generar una corriente en ella? Al principio no estaba claro cuál era la importancia de este descubrimiento. Poco después, según la historia, un político poco de fiar le preguntó

a Faraday si su descubrimiento tenía algún valor práctico y se dice que contestó: «Caballero, no sé para qué sirve. No obstante, de algo sí que estoy seguro: un día, usted recaudará impuestos por ello».

Quizá este sencillo fenómeno, que puedes comprobar fácilmente en casa, no tenga ningún sentido, pero no es una exageración decir que es la base de toda nuestra economía y de todo el mundo que el ser humano se ha construido. Sin este fenómeno seguiríamos viviendo más o menos como nuestros antepasados de los siglos XVII y XVIII: alumbrándonos con velas, sin radio, sin televisión, sin teléfonos y sin ordenadores.

¿Cómo conseguimos toda la electricidad que utilizamos hoy en día? La mayor parte proviene de centrales eléctricas, que la producen mediante generadores eléctricos. En esencia, lo que hacen los generadores es mover bobinas de cobre a través de campos magnéticos (ya no movemos los imanes). El primer generador de Michael Faraday era un disco de cobre que él hacía girar con una manivela entre los dos brazos de un imán de herradura. Un cepillo en el borde exterior del disco estaba conectado a un cable, y otro cepillo en el eje central del disco giratorio estaba conectado a un segundo cable. Si unía los dos cables a través de un amperímetro, podía medir la corriente que se generaba. Mediante este artilugio, la energía (¡potencia muscular!) que introducía en el sistema se convertía en electricidad. Pero este generador no era muy eficiente por varias razones, entre ellas porque tenía que girar el disco de cobre con la mano. En cierto sentido, los generadores deberían llamarse conversores de energía: todo lo que hacen es convertir un tipo de energía, en este caso energía cinética, en energía eléctrica. Dicho de otro modo, a nadie le regalan la energía. (En el capítulo siguiente expongo en profundidad la conversión de energía.)

De la electricidad al movimiento

Ahora que hemos aprendido cómo convertir el movimiento en electricidad, veamos cómo ir en la dirección opuesta y convertir la electricidad en movimiento. Por fin, las empresas automovilísticas se están gastando miles de millones de dólares en desarrollar coches que hagan precisamente eso. Todas están intentando inventar motores eléctricos potentes y eficientes para esos coches. ¿Qué son esos motores?

Son dispositivos que convierten la energía eléctrica en movimiento. Todos se basan en un principio aparentemente sencillo que en realidad es bastante complicado: si colocas una bobina de cable conductor (por la que pasa una corriente) en un campo magnético, la bobina tiende a rotar. La velocidad con la que rota depende de varios factores: la intensidad de la corriente y la del campo magnético, o la forma de la bobina, entre otros. Los físicos dicen que un campo magnético ejerce un momento de fuerza sobre una bobina conductora. «Momento de fuerza» es la expresión para una fuerza que hace que las cosas roten.

Puedes hacerte fácilmente una idea visual del momento de fuerza si alguna vez has cambiado un neumático. Sabes que una de las partes más difíciles de la operación es aflojar las tuercas que sujetan la rueda al eje. Como estas tuercas normalmente están muy apretadas (a veces incluso parece que estén bloqueadas), tienes que ejercer una fuerza tremenda sobre la palanca que se engancha a las tuercas. Cuanto más largo sea el brazo de la palanca, mayor será el momento de fuerza. Si el brazo fuese extraordinariamente largo, te bastaría un pequeño esfuerzo para aflojar los tornillos. Una vez que has cambiado el neumático pinchado con el de repuesto, ejerces un momento de fuerza en la dirección opuesta para apretar las tuercas.

Por supuesto, hay veces en que, por muy fuerte que empujes o tires, no consigues mover la tuerca. En ese caso, o bien echas un poco de tres-en-uno (deberías llevarlo siempre en el maletero, para esto y para muchas otras cosas) y esperas unos minutos a que se afloje, o bien pruebas a golpear el brazo de la palanca con un martillo (¡otra herramienta que siempre deberías llevar contigo!).

No hace falta que veamos el momento de fuerza en detalle aquí. Todo lo que necesitas saber es que si haces que circule una corriente a través de una bobina (puedes utilizar una batería) y colocas la bobina en un campo magnético, este ejercerá un momento de fuerza sobre la bobina, que tenderá a rotar. Cuanto más alta sea la corriente y más intenso el campo magnético, mayor será el momento de fuerza. Este es el principio en el que se basa el motor de corriente continua (CC), del que es muy fácil fabricar una versión sencilla.

¿Cuál es exactamente la diferencia entre la corriente continua y la alterna? La polaridad de los terminales positivo y negativo de una batería no cambia, es

constante. Así que, si conectas una batería a un cable conductor, la corriente siempre fluirá en una dirección; esto es lo que se llama corriente continua. En casa (en Estados Unidos), sin embargo, la diferencia de potencial entre los dos agujeros de un enchufe se invierte con una frecuencia de 60 hercios. En los Países Bajos, y en la mayor parte de Europa, la frecuencia es de 50 hercios. Si conectas un cable, por ejemplo una bombilla incandescente o un calentador, a un enchufe en casa, la corriente oscilará (entre una dirección y la contraria) con una frecuencia de 60 hercios (por tanto, cambiará de sentido 120 veces por segundo). Esta es la corriente alterna, o CA.

Todos los años, en mi clase de electricidad y magnetismo hacemos un concurso de motores. (Ya lo hacían antes que yo mis colegas y amigos los profesores Wit Busza y Victor Weisskopf.) Cada alumno recibe un sobre con estos sencillos materiales: dos metros de cable de cobre aislado, dos clips, dos chinchetas, dos imanes y un pequeño bloque de madera. Tienen que utilizar una pila AA de 1,5 voltios. Pueden usar cualquier herramienta, pueden cortar la madera y hacerle agujeros, pero el motor debe estar construido únicamente con el material que hay en el sobre (no está permitido utilizar cinta aislante o pegamento). La tarea consiste en construir un motor que funcione tan rápido como sea posible (que produzca el máximo de revoluciones por minuto, o rpm) a partir de estos sencillos componentes. Los clips están pensados para servir de soporte a la bobina rotatoria, el cable es necesario para construir la bobina y los imanes han de colocarse de forma que ejerzan un momento de fuerza sobre la bobina cuando la atraviesa la corriente proveniente de la batería.

Supongamos que quieres participar en el concurso, y que, en cuanto conectas la batería a tu bobina, esta empieza a rotar en la dirección de las agujas del reloj. Hasta aquí, todo bien. Pero, quizá para tu sorpresa, la bobina no sigue rotando. El motivo es que, cada media vuelta, el momento de fuerza que se ejerce sobre la bobina cambia de dirección. Al invertirse, el momento de fuerza se opone a la rotación en el sentido de las agujas del reloj y puede que la bobina llegue incluso a girar brevemente en el sentido contrario. Está claro que esto no es lo que queremos que haga el motor. Queremos una rotación continua en una sola dirección (ya sea en el de las agujas del reloj o en el contrario). Este problema puede solucionarse

invirtiendo cada media vuelta la dirección de la corriente que pasa por la bobina. De esta manera, el momento de fuerza sobre la bobina siempre se ejercerá en la misma dirección y, por tanto, esta podrá seguir rotando en dicha dirección.

Al construir sus motores, mis alumnos tienen que enfrentarse al inevitable problema de la inversión del momento de fuerza, y unos pocos consiguen construir lo que llamamos un conmutador, un dispositivo que invierte la corriente cada media vuelta. Pero es complicado. Por suerte, hay una solución muy fácil e inteligente para este problema sin invertir la corriente. Si puedes hacer que la corriente (y, por tanto, el momento de fuerza) se anule cada media vuelta, entonces la bobina no experimenta ningún momento de fuerza durante la mitad de cada vuelta y el momento tiene siempre la misma dirección durante la otra mitad. El resultado neto es que la bobina sigue rotando.

Les pongo un punto por cada cien rotaciones por minuto que consiguen, hasta un máximo de veinte. Les encanta este proyecto y, como buenos alumnos del MIT que son, a lo largo de los años se les han ocurrido diseños asombrosos[34]. Casi todos los alumnos construyen con bastante facilidad un motor que gira a unas 400 rpm. ¿Cómo consiguen que la bobina siga girando en la misma dirección? Antes de nada, como el cable está aislado por completo, tienen que quitar el aislante de uno de los extremos de la bobina de cable para que siempre haga contacto con un terminal de la batería (por supuesto, da igual el extremo que elijan). El otro extremo del cable es bastante más difícil. Los alumnos quieren que la corriente circule por la bobina solo durante la mitad de su rotación; es decir, quieren romper el circuito a mitad del giro. Así que pelan la mitad del aislante de ese extremo del cable, de forma que la mitad de la circunferencia del cable está al descubierto. Durante los períodos en que la corriente se detiene (cada media vuelta), la bobina sigue rotando aun cuando no se ejerce sobre ella ningún momento de fuerza (el rozamiento no es suficiente para detenerla en media rotación). Hay que hacer pruebas para acertar cuánto hay que pelar el cable y para decidir qué parte del cable ha de quedar al descubierto (pero, como digo, casi todos llegan a las 400 rpm). Eso es lo que yo conseguí, nunca he llegado mucho más allá de las 400 rpm.

---

[34] Si quieres intentarlo, puedes encontrar las instrucciones en el enlace al pdf de mis notas para la clase 11 en http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-andmagnetism-spring-2002/lecture-notes/.

Después varios alumnos me dijeron cuál era mi problema. Cuando la bobina empieza a girar a más de unos pocos cientos de rpm, comienza a vibrar sobre el soporte (los clips), a menudo rompiendo el circuito y, por tanto, interrumpiendo el momento de fuerza. A los alumnos más avispados se les ocurrió cómo sujetar la bobina a los clips con un trozo de cable en cada extremo, pero permitiendo que siguiese rotando con poco rozamiento. Ese pequeño ajuste, aunque cueste creerlo, les permitió llegar a ¡4.000 rpm!

Los alumnos derrochan imaginación. En casi todos los motores, el eje de rotación es horizontal, pero uno construyó un motor en el que era vertical. El mejor consiguió llegar a 5.200 rpm (¡con una pequeña pila AA de 1,5 voltios, recuerda!) Recuerdo al alumno que ganó. Era de primer año y hablando conmigo tras la clase me dijo: «Profesor Lewin, esto es fácil. Puedo construirle un motor de 4.000 rpm en unos diez minutos». Y lo hizo, allí mismo.

Pero no hace falta que intentes crear uno de estos. Hay un motor aún más sencillo que puedes fabricar en unos pocos minutos, incluso con menos componentes: una pila alcalina, un trozo pequeño de cable de cobre, un tornillo (o clavo) para pladur y un pequeño imán de disco. Se llama motor homopolar y aquí se puede ver una descripción paso a paso de cómo fabricarlo y un vídeo del motor en funcionamiento[35].

Tan divertida como el concurso del motor, aunque de otra forma muy distinta, es otra demostración que hago en clase con una bobina eléctrica de 30 centímetros de diámetro y una placa conductora. Como ya sabes, una corriente eléctrica, al circular por una bobina, produce un campo magnético. Una corriente eléctrica alterna (AC) en una bobina produce un campo magnético variable. (Recuerda que la corriente que crea una pila es corriente continua.) Como la frecuencia de la electricidad en la sala de conferencias es de 60 hercios de corriente alterna, igual que en cualquier otro sitio de Estados Unidos, la corriente en mi bobina se invierte cada 1/120 segundos. Si coloco la bobina sobre una placa de metal, el campo magnético variable (lo llamaré campo magnético externo) penetrará en la placa conductora. Según la ley de Faraday, este campo magnético variable provocará corrientes en la placa metálica, llamadas corrientes parásitas, que a su vez producirán sus propios

[35] Escríbeme si el tuyo va a más de 5.000 rpm): www.evilmadscientist.com/article.php/HomopolarMotor

campos magnéticos variables. Habrá, por tanto, dos campos magnéticos: el externo y el producido por las corrientes parásitas.

Durante aproximadamente la mitad del ciclo de 1/60 segundos, los dos campos tienen direcciones opuestas y la placa repelerá la bobina; durante la otra mitad, los campos magnéticos tendrán la misma dirección y la bobina se verá atraída hacia la placa. Por razones bastante sutiles y demasiado técnicas para verlas aquí, existe una fuerza neta de repulsión sobre la bobina, de magnitud suficiente para hacer que la bobina levite[36].

Pensé que deberíamos poder aprovechar esta fuerza para hacer levitar a una persona, y decidí que, como los magos, lo probaría en clase con una mujer, construyendo una bobina gigante y haciendo que se tumbase sobre ella. Así que, con mis amigos Markos Hankin y Bil Sanford (del grupo de demostraciones de física), trabajamos duro para conseguir que circulase la suficiente corriente por nuestras bobinas, pero acabamos fundiendo los fusibles una y otra vez. Así que llamamos al Departamento de Instalaciones del MIT, les dijimos lo que necesitábamos —una corriente de unos pocos miles de amperios— y se empezaron a reír. «¡Tendríamos que rediseñar el MIT para conseguiros tanta corriente!», nos dijeron. Una lástima, porque ya me habían escrito varias mujeres ofreciéndose para la levitación. Tuve que responderles para pedirles disculpas. Pero eso no nos detuvo, como podrás ver en el vídeo de la clase, aproximadamente en el minuto 47 ½. Cumplí mi promesa; pero la mujer resultó ser mucho más ligera de lo que en un principio yo tenía pensado.

El electromagnetismo al rescate

Hacer que una mujer levite da lugar a una demostración bastante buena —y graciosa—, pero la levitación magnética tiene numerosas aplicaciones más asombrosas y mucho más útiles. Es la base de las nuevas tecnologías que se utilizan en varias de las formas de transporte más curiosas, rápidas y menos contaminantes del mundo.

Probablemente habrás oído hablar de los trenes maglev de alta velocidad. Para

---

[36] Puedes verlo en este vídeo de la clase 19 del curso 8.02 (a los 44 minutos y 20 segundos, aproximadamente): http://videolectures.net/mit802s02_lewin_lec19/

mucha gente, son absolutamente fascinantes, ya que combinan la magia de las fuerzas magnéticas invisibles con el diseño aerodinámico moderno más elegante, todo a velocidades extraordinariamente elevadas. Quizá no sabías que «maglev» viene de magnetic levitation, «levitación magnética», pero lo que sí sabes es que si acercas dos polos magnéticos se atraen o se repelen. La maravillosa idea en la que se basan los trenes maglev es que, si encuentras la manera de encauzar esa fuerza de atracción o repulsión, puedes hacer que un tren levite sobre las vías y tirar de él o empujarlo a gran velocidad. En un tipo de tren que funciona por suspensión electromagnética (conocida como EMS: electromagnetic suspension), los electroimanes del tren lo elevan por atracción magnética. De la parte inferior de los trenes sale un brazo con forma de C cuyo extremo superior está sujeto al tren, mientras que el inferior, bajo la vía, tiene imanes en su superficie superior que elevan el tren hacia los raíles, construidos con material ferromagnético.

Como no es deseable que el tren se enganche a los raíles, y como la fuerza de atracción es inherentemente inestable, hace falta un complicado sistema de realimentación para que el tren se mantenga a la distancia adecuada de los raíles, ¡que es de apenas un par de centímetros! Un sistema de electroimanes separado, que se encienden y se apagan de forma sincronizada, es el que propulsa el tren, «tirando» de él hacia delante.

El otro sistema importante de trenes maglev, conocido como suspensión electrodinámica (EDS: electrodynamic suspension), se basa en la repulsión magnética y utiliza unos dispositivos extraordinarios llamados superconductores. Un superconductor es una sustancia que, cuando se enfría mucho, no tiene resistencia eléctrica. Por tanto, una bobina superenfriada hecha de material superconductor necesita muy poca potencia eléctrica para crear un campo magnético muy intenso. Más sorprendente aún es que un imán superconductor puede actuar como una trampa magnética: si se le acerca un imán, la interacción entre la gravedad y el superconductor mantiene el imán a una distancia determinada. Por consiguiente, los maglevs que utilizan superconductores son naturalmente mucho más estables que los sistemas EMS. Si intentas juntar o separar el superconductor y el imán, verás que te resulta muy difícil. Ambos quieren seguir a la misma distancia el uno del

otro[37].

Si el tren, que lleva imanes en su parte inferior, se acerca demasiado a la vía, que tiene superconductores, la fuerza de repulsión creciente lo aleja; si se distancia demasiado, la gravedad tira de él y vuelve a acercarlo a la vía. Por tanto, el tren levita en equilibrio. El desplazamiento del tren hacia delante, que se produce también principalmente mediante una fuerza de repulsión, es más sencillo que en los sistemas EMS.

Ambos métodos tienen ventajas e inconvenientes, pero los dos han eliminado en la práctica el problema del rozamiento de las ruedas de tren convencionales —uno de los componentes principales del desgaste del tren—, permitiendo al mismo tiempo un desplazamiento mucho más suave, silencioso y, sobre todo, rápido. (Siguen teniendo que hacer frente al problema del rozamiento del aire, que aumenta rápidamente con la velocidad del tren, por eso su diseño aerodinámico es tan elegante.) El tren maglev de Shangai, que funciona mediante suspensión electromagnética y se inauguró en 2004, tarda unos ocho minutos en recorrer los treinta kilómetros entre la ciudad y el aeropuerto, a una velocidad media (en 2008) de entre 224 y 251 kilómetros por hora (aunque es capaz de alcanzar los 431 kilómetros por hora, más rápido que cualquier otro tren de alta velocidad en todo el mundo)[38].

La velocidad más alta de la que hay constancia para un tren maglev corresponde a unas pruebas en Japón, en las que el tren JR-Maglev alcanzó los 581 kilómetros por hora[39].

En YouTube hay muchos vídeos muy graciosos e instructivos sobre la tecnología maglev. Como este, en el que un chico utiliza seis imanes y un poco de plastilina para hacer levitar un lápiz mientras da vueltas, algo que puedes probar fácilmente en casa[40]. Échale un vistazo también a este otro, en el que se muestra el uso de superconductores para construir un tren en miniatura que recorre un circuito a toda velocidad, y que incluso contiene una pequeña sección explicativa creada por

---

[37] Hay un pequeño vídeo maravilloso que demuestra la relación entre un imán y un superconductor en http://www.youtube.com/watch?v=nWTSzBWEsms.

[38] Aquí puedes ver un breve vídeo del tren de Shangai, grabado por el fabricante: www.youtube.com/watch?v=weWmTldrOyo

[39] Aquí hay un vídeo corto del tren japonés: www.youtube.com/watch?v=VuSrLvCVoVk&feature=related

[40] www.youtube.com/watch?v=rrRG38WpkTQ&feature=related

animación[41].

Sin embargo, mi demostración favorita de la levitación magnética es la pequeña peonza maravillosa llamada Levitron (puedes ver varias versiones en www.levitron.com). En mi despacho tengo uno de los primeros modelos, que ha hecho las delicias de cientos de visitas.

Los sistemas de trenes maglev ofrecen ventajas medioambientales reales: hacen un uso relativamente eficiente de la electricidad y no emiten gases de efecto invernadero. Sin embargo, no todo son ventajas con los trenes maglev: como la mayoría de las vías maglev no son compatibles con las ya existentes, estos sistemas requieren una gran inversión inicial, lo que ha frenado hasta ahora un uso comercial extendido. Aun así, el desarrollo de medios de transporte masivos más eficientes y limpios es absolutamente crucial para nuestro futuro, si no queremos cocer nuestro propio planeta.

El extraordinario logro de Maxwell

Muchos físicos creen que James Clerk Maxwell es uno de los físicos más importantes de todos los tiempos, quizá justo por detrás de Newton y Einstein. Realizó contribuciones en una increíble variedad de campos de la física, desde el análisis de los anillos de Saturno a la exploración del comportamiento de los gases, la termodinámica y la teoría del color. Pero su logro más deslumbrante fue el desarrollo de cuatro ecuaciones que describen y relacionan la electricidad y el magnetismo, que han acabado conociéndose como ecuaciones de Maxwell. Estas cuatro ecuaciones solo son sencillas en apariencia; las matemáticas en las que se basan son bastante complicadas. Pero si te sientes cómodo entre integrales y ecuaciones diferenciales, por favor échales un vistazo a mis clases o busca en la red para saber más sobre ellas. Para lo que nos afecta, esto es lo que hizo Maxwell, explicado de una forma sencilla.

Lo principal es que Maxwell unificó la teoría de la electricidad y el magnetismo al demostrar que estos dos fenómenos eran en realidad diferentes manifestaciones de un único fenómeno, el electromagnetismo. Salvo por una excepción muy importante, las cuatro ecuaciones no son sus «leyes» o invenciones; ya existían de

[41] www.youtube.com/watch?v=GHtAwQXVsuk&feature=related

alguna forma. Lo que Maxwell hizo, no obstante, fue unirlas en lo que llamamos una teoría de campos completa.

La primera de estas ecuaciones es la ley de Gauss para la electricidad, que explica la relación entre las cargas eléctricas y la intensidad y distribución de los campos eléctricos que crean. La segunda ecuación, la ley de Gauss para el magnetismo, es la más sencilla de las cuatro y afirma varias cosas a la vez. Dice que no existen los monopolos magnéticos: los imanes siempre tienen polo norte y polo sur (se llaman dipolos), a diferencia de la electricidad, que sí permite los monopolos eléctricos (un monopolo es una partícula cargada positiva o bien negativamente). Si rompes uno de tus imanes (yo tengo muchos en la nevera) en dos partes, cada una tiene polos norte y sur. No hay manera de acabar aislando un polo norte magnético en una mano y un polo sur en la otra. Sin embargo, si tienes un objeto cargado eléctricamente (supongamos que con carga positiva) y lo rompes en dos partes, ambas pueden tener carga positiva.

A partir de aquí, las cosas se ponen realmente interesantes. La tercera ecuación es la ley de Faraday, que describe cómo los campos magnéticos variables producen campos eléctricos. Puedes ver cómo esta ecuación sirve de base teórica a los generadores eléctricos de los que he hablado antes. La última ecuación es la ley de Ampère, en la que Maxwell introdujo importantes modificaciones. La ley de Ampère original demostraba que una corriente eléctrica generaba un campo magnético, pero Maxwell la refinó para contemplar el hecho de que un campo eléctrico variable crea un campo magnético.

Jugando con las cuatro ecuaciones, Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas que viajaban por el espacio vacío. Pudo incluso calcular la velocidad de estas ondas: el resultado realmente asombroso fue que su velocidad coincidía con la de la luz, es decir, ¡llegó a la conclusión de que la propia luz tenía que ser una onda electromagnética!

Estos científicos —Ampère, Faraday y Maxwell— sabían que estaban al borde de una revolución total. Los investigadores habían hecho un serio esfuerzo por entender la electricidad durante un siglo, pero ahora estos señores estaban haciendo nuevos descubrimientos constantemente. A veces me pregunto cómo conseguirían conciliar el sueño por la noche.

Las ecuaciones de Maxwell, por todo lo que lograron unificar en 1861, fueron realmente la hazaña suprema de la física del siglo XIX, y seguramente de toda la física entre Newton y Einstein. Y como todos los descubrimientos profundos, indicaron el rumbo para nuevos intentos de unificar las teorías científicas fundamentales.

Desde Maxwell, los físicos han invertido incalculables esfuerzos en tratar de desarrollar una única teoría unificada de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la electromagnética, la nuclear fuerte, la nuclear débil y la gravitatoria. Albert Einstein dedicó los treinta últimos años de su vida a un fallido intento de combinar el electromagnetismo y la gravedad en lo que se conocería como una teoría de campos unificada.

La búsqueda de esta unificación aún continúa. Abdus Salam, Sheldon Glashow y Steven Weinberg obtuvieron el premio Nobel en 1979 por la unificación del electromagnetismo y la fuerza nuclear débil en lo que se conoce como fuerza electrodébil. Muchos físicos están intentando unificar la fuerza electrodébil y la fuerza nuclear fuerte en lo que se denomina una teoría de la gran unificación (TGU). Llegar a ese nivel de unificación sería un logro asombroso, a la altura del de Maxwell. Y si, de alguna forma, en algún lugar, un físico consigue alguna vez combinar la gravedad con la TGU para crear lo que muchos llaman una teoría del todo, descubriría el más santo de los Santos Griales de la física. La unificación es un sueño poderoso.

Por eso, en mi curso de Electricidad y Magnetismo, cuando por fin vemos las cuatro ecuaciones de Maxwell en todo su esplendor y sencillez, las proyecto por toda la sala de conferencias y celebro este importante hito con los alumnos repartiéndoles flores. Si eres capaz de soportar un poco de suspense, podrás leer más al respecto en el capítulo 15.

Capítulo 9

Conservación de la energía. *Plus ça change…*

Una de las demostraciones más famosas que he hecho a lo largo de los años pone en riesgo mi vida, al colocar mi cabeza en plena trayectoria de una bola de demolición (una versión reducida de una bola de demolición, todo sea dicho, pero que podría matarme fácilmente, te lo aseguro). Mientras que las bolas que utilizan los equipos de demolición se fabrican con una lenteja, o peso esférico, de unos 1.000 kilos, la mía lleva una de 15 kilos. De pie a un lado de la sala de conferencias, con la espalda pegada a la pared, sostengo la lenteja junto a la barbilla. Al soltarla, he de tener cuidado para no darle ningún tipo de impulso, ni siquiera un pequeño empujoncito. El más mínimo impulso, seguro que me hará daño (o, como digo, posiblemente incluso podría matarme). Les pido a mis alumnos que no me distraigan, que no hagan ruido e incluso que contengan por un momento la respiración; si no, esta podría ser mi última clase.

He de confesar que cada vez que realizo esta demostración siento una descarga de adrenalina cuando la bola vuelve hacia mí; aunque estoy seguro de que la física me salvará, siempre me pone nervioso estar ahí mientras la bola vuelve volando hacia mí hasta rozarme la barbilla. Instintivamente, aprieto los dientes. ¡Y reconozco que también cierro los ojos! ¿Qué, te preguntarás, es lo que me mueve a hacer esta demostración? Mi confianza ciega en uno de los conceptos más importantes de toda la física: la ley de conservación de la energía.

Una de las características más extraordinarias de nuestro mundo es que una forma de energía puede transformarse en otra, y después en otra y en otra, y transformarse de nuevo en la forma original. La energía puede transformarse, pero nunca se pierde ni se gana. De hecho, esta transformación sucede continuamente. Todas las civilizaciones, no solo la nuestra, sino incluso las menos sofisticadas tecnológicamente, dependen de este proceso, en sus muchas variaciones. Evidentemente, por eso comemos: para convertir la energía química de los alimentos, almacenada sobre todo en el carbono, en un compuesto denominado adenosín trifosfato (ATP: adenosine triphosphate), que almacena la energía que nuestras células utilizan para realizar distintas tareas. Es también lo que sucede

cuando encendemos una hoguera, que convierte la energía química almacenada en la madera o el carbón en calor y dióxido de carbono (el carbono que contienen se combina con oxígeno).

Es lo que hace que una flecha vuele tras ser disparada desde el arco, transformando la energía potencial que se acumula cuando tiras de la cuerda del arco en energía cinética que impulsa la flecha hacia delante. En un arma de fuego, la conversión de la energía química de la pólvora en la energía cinética del gas en rápida expansión es lo que impulsa las balas desde el tambor. Cuando montas en bicicleta, la energía que impulsa los pedales empieza siendo la energía química de tu desayuno o tu almuerzo, que tu cuerpo ha transformado en otro tipo de energía química (ATP). Tus músculos utilizan esa energía química, convirtiendo una parte en energía mecánica, para contraerse y relajarse, permitiendo que empujes los pedales. La energía química almacenada en la batería de tu coche se convierte en energía eléctrica cuando lo arrancas. Parte de la energía eléctrica va a los cilindros, donde hace que prenda la mezcla de gasolina, liberando la energía química que se produce en su combustión. Esa energía se convierte después en calor, que aumenta la presión del gas en el cilindro, lo que a su vez empuja los pistones. Estos hacen girar el cigüeñal y la transmisión comunica la energía a las ruedas, provocando su rotación. Mediante este extraordinario proceso, se aprovecha la energía química de la gasolina para hacer que los coches se muevan.

Los coches híbridos se basan en parte de este proceso a la inversa: transforman parte de la energía cinética del coche —cuando pisas el freno— en energía eléctrica que se almacena en una batería que puede alimentar un motor eléctrico. En una caldera de gasóleo, la energía química del gasóleo se convierte en calor, que calienta el agua que una bomba hace circular por los radiadores. En las luces de neón, la energía cinética de las cargas eléctricas que atraviesan un tubo de gas neón se convierte en luz visible.

Las aplicaciones son casi ilimitadas. En los reactores nucleares, la energía nuclear almacenada en los núcleos de uranio o plutonio se transforma en calor que convierte el agua en vapor, que a su vez impulsa las turbinas que generan electricidad. La energía química almacenada en los combustibles fósiles —no solo el petróleo y la gasolina, sino también el carbón y el gas natural— se transforma en

calor y, en el caso de una central eléctrica, se acaba convirtiendo en energía eléctrica.

Puedes contemplar las maravillas de la conversión de energía fácilmente si fabricas una batería. Hay muchos tipos de baterías, desde las que lleva un coche híbrido o convencional a las que alimentan el ratón inalámbrico de un ordenador o un teléfono móvil. Aunque te cueste creerlo, puedes fabricar una batería con una patata, una moneda, un clavo galvanizado y dos trozos de cable de cobre (cada uno de unos 15 centímetros, pelados un centímetro por cada extremo). Introduce el clavo casi por completo en un lado de la patata, haz una hendidura en el otro y mete en ella la moneda. Engancha un extremo de uno de los trozos de cable al clavo (o enróscalo a la cabeza del clavo) y engancha el otro trozo a la moneda, o introdúcelo en la hendidura, de forma que haga contacto con la moneda. Después, toca los extremos libres de los cables con los pequeños bornes de una luz de árbol de Navidad. Debería parpadear un poco. ¡Enhorabuena! Puedes ver decenas de artilugios como este en YouTube, ¿por qué no intentarlo?

Todo el tiempo se están produciendo a nuestro alrededor conversiones de energía, pero algunas de ellas son más evidentes que otras. Uno de los ejemplos menos intuitivos es el de la llamada energía potencial gravitatoria. Aunque no solemos pensar que los objetos estáticos tienen energía, así es; y bastante, en algunos casos. Como la gravedad siempre intenta atraer los objetos hacia el centro de la Tierra, cualquier objeto que sueltes desde cierta altura cogerá velocidad. Al hacerlo, perderá energía potencial gravitatoria, pero ganará energía cinética. Ni se pierde si crea energía, ¡es un juego de suma cero! Si un objeto de masa m cae a una distancia vertical h, su energía potencial disminuye en una cantidad mgh (g es la aceleración de la gravedad, unos 9,8 metros por segundo al cuadrado), pero su energía cinética aumentará en la misma cantidad. Si mueves el objeto hacia arriba una distancia vertical h, su energía potencial gravitatoria aumentará en una cantidad mgh y tendrás que producir esa energía (tendrás que hacer trabajo).

Si un libro de una masa de un kilogramo está en una estantería a dos metros del suelo, cuando caiga su energía potencial gravitatoria disminuirá en

$$1 \times 9{,}8 \times 2 = 19{,}6 \text{ julios},$$

pero llegará al suelo con una energía cinética de 19,6 julios.

Creo que energía potencial gravitatoria es un nombre excelente. Piénsalo de este modo: si recojo el libro del suelo y lo coloco en la estantería, consumo 19,6 julios de mi energía. ¿Se ha perdido esta energía? ¡No! Una vez que el libro está a dos metros de altura, tiene el «potencial» de devolverme esa energía en forma de energía cinética cuando se me caiga al suelo, ¡ya sea al día siguiente o un año después! Cuanto más alto esté el libro por encima del suelo, mayor será la energía «potencialmente» disponible, pero, por supuesto, yo tendré que proporcionar esa energía adicional para colocar el libro más arriba.

De forma similar, hace falta energía para estirar la cuerda del arco al disparar una flecha. Esa energía se almacena en el arco y está «potencialmente» disponible para transformarse en la energía cinética que le proporciona a la flecha su velocidad cuando decidas soltarlo.

Existe una sencilla ecuación que me sirve para ver algo maravilloso. Si me permites utilizar unas pocas matemáticas, entenderás por qué funciona el (no) experimento más famoso de Galileo. Recuerda que se cuenta que dejó caer bolas de distinta masa (y, por tanto, distinto peso) desde la torre inclinada de Pisa para demostrar que la velocidad a la que caían era independiente de su masa. De las leyes del movimiento de Newton se deduce que la energía cinética (EC) de un objeto en movimiento es proporcional tanto a su masa como al cuadrado de su velocidad; la ecuación es $EC = ½\ mv^2$. Y como sabemos que la variación de la energía potencial gravitatoria de un objeto se transforma en energía cinética, podemos decir que mgh es igual a $½\ mv^2$, obteniendo la ecuación $mgh = ½\ mv^2$. Si divides ambos miembros por m, la masa desaparece por completo de la ecuación, resultando $gh = ½\ v^2$. Para deshacernos de la fracción, multiplicamos ambos miembros de la ecuación por 2, obteniendo $2gh = v^2$. Esto significa que v, la velocidad, que es lo que Galileo quería medir, es igual a la raíz cuadrada de $2gh$.[42] ¡Fíjate en que la masa ha desaparecido por completo de la ecuación! No es un factor, en sentido literal; la velocidad no depende de la masa. Para poner un ejemplo concreto, si lanzamos una roca (de

[42] Si quieres utilizar esta ecuación en casa, usa 9,8 como valor de *g* y pon *h* en metros; *v* estará entonces en metros por segundo. Si *h* es 1,5 metros (sobre el suelo), el objeto llegará al suelo a unos 5,4 metros por segundo, que son unos 19 kilómetros por hora.

masa arbitraria) desde una altura de 100 metros, en ausencia de rozamiento del aire llegará al suelo con una velocidad de unos 45 metros por segundo, alrededor de 160 kilómetros por hora.

Imagina que una roca (de masa arbitraria) cae desde unos pocos miles de kilómetros de distancia de la Tierra. ¿Con qué velocidad entraría en la atmósfera terrestre? Por desgracia, no podemos utilizar la sencilla ecuación anterior según la cual la velocidad es la raíz cuadrada de $2gh$, porque la aceleración gravitatoria depende fuertemente de la distancia a la Tierra. A la distancia de la Luna (unos 385.000 kilómetros), la aceleración gravitatoria debida a la Tierra es unas 3.600 veces menor que cerca de la superficie terrestre. No te mostraré los cálculos, pero créeme, ¡la velocidad sería de unos 40.000 kilómetros por hora!

Puede que ahora entiendas lo importante que es la energía potencial gravitatoria en astronomía. Como explicaré en el capítulo 13, cuando la materia cae desde una gran distancia en una estrella de neutrones, lo hace con una velocidad aproximada de 160.000 kilómetros por segundo (¡sí, por segundo!). Si la roca tuviese una masa de solo un kilogramo, su energía cinética sería de alrededor de 13.000 billones de julios (13×10^{15}), que es aproximadamente la cantidad de energía que una gran central eléctrica (de 1.000 MW) produce en unos seis meses.

El hecho de que distintos tipos de energía se puedan transformar unos en otros ya es extraordinario de por sí, pero aún más espectacular es que nunca se produce una pérdida neta de energía. Nunca. Resulta asombroso. Por eso la bola de demolición nunca me ha matado.

Cuando elevo la bola de 15 kilos hasta mi barbilla una distancia vertical h, aumento su energía potencial gravitatoria en mgh. Al soltarla, empieza a oscilar por la habitación debido a la fuerza de la gravedad, y mgh se convierte en energía cinética. Aquí, h es la distancia vertical entre mi barbilla y la posición más baja de la lenteja en el extremo de la cuerda. Cuando la bola alcanza su punto más bajo en la oscilación, su energía cinética será mgh. Cuando completa el arco y alcanza el límite superior de su oscilación, esa energía cinética se transforma de nuevo en energía potencial, por lo que en el punto más alto de la oscilación del péndulo la bola se detiene durante un instante. Si no hay energía cinética, no hay movimiento. Pero eso solo dura un breve instante, porque después la bola vuelve a bajar, en su

oscilación de vuelta, y la energía potencial vuelve a transformarse en energía cinética. La suma de energía cinética y potencia se llama energía mecánica y, en ausencia de rozamiento (en este caso, del aire sobre la lenteja), la energía mecánica total no varía, se conserva.

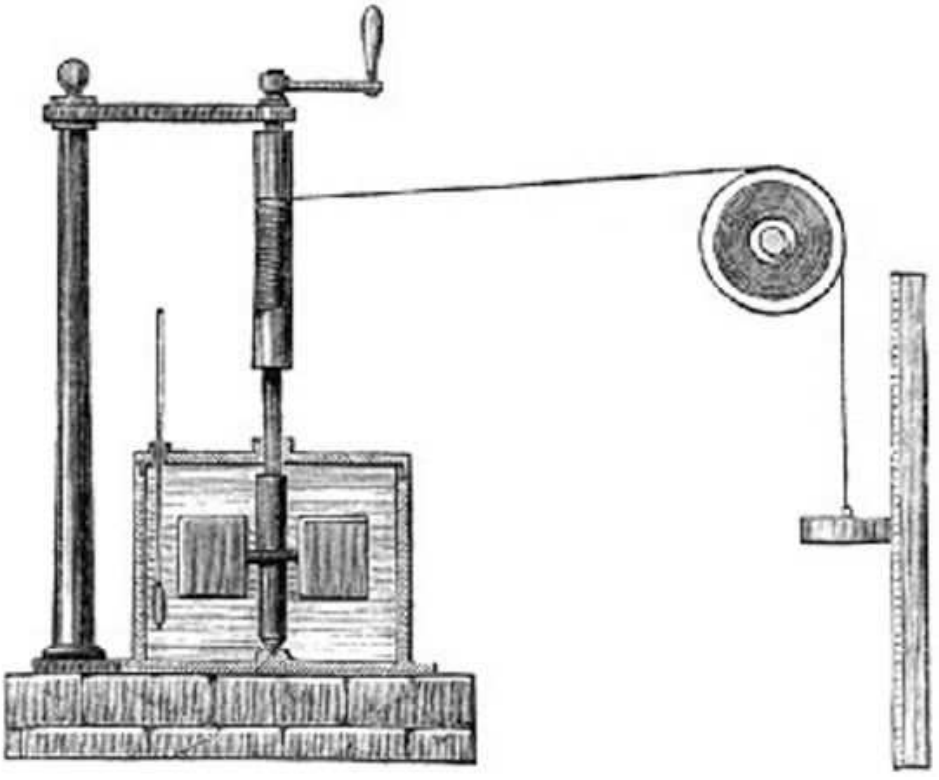
Esto significa que la bola no puede elevarse por encima del lugar exacto desde el que ha sido lanzada (siempre que no se le suministre energía adicional en su recorrido). El rozamiento del aire es mi colchón de seguridad. El rozamiento absorbe una cantidad muy pequeña de la energía mecánica del péndulo, que pasa al aire en forma de calor. Por consiguiente, la lenteja se detiene a apenas un cuarto de centímetro de mi barbilla, como puedes ver en el vídeo de la clase 11 del curso 8.01. Susan me ha visto hacer la demostración tres veces, y cada vez ha sentido escalofríos. Alguien me preguntó una vez si practicaba mucho y siempre he dicho la verdad, que no tengo que practicar porque confío plenamente en la conservación de la energía.

Pero si le diese un mínimo impulso a la bola al soltarla —imaginemos que tosiese justo en ese momento y que eso hiciese que le diese un pequeño empujón—, en su oscilación de vuelta se elevaría por encima del punto desde donde la he soltado, destrozándome la barbilla.

La conservación de la energía se descubrió en gran medida gracias al trabajo a mediados del siglo XIX de James Joule, un inglés hijo de un cervecero. Su trabajo fue tan importante para entender cuál era la naturaleza de la energía que su unidad internacional de medida, el julio, lleva este nombre en su honor. Su padre los mandó a él y a su hermano a estudiar con el famoso científico experimental John Dalton. Evidentemente, Joule sacó buen provecho de las enseñanzas de Dalton. Cuando Joule heredó la fábrica de cerveza de su padre, llevó a cabo una serie de experimentos innovadores en el sótano de la fábrica, explorando con métodos ingeniosos las características de la electricidad, el calor y la energía mecánica. Uno de sus descubrimientos fue que la corriente eléctrica produce calor en un conductor; para ello, metió bobinas de distintos metales por las que hacía circular corrientes en tarros con agua y midió los cambios de temperatura.

Joule tuvo la intuición fundamental de que el calor es una forma de energía, algo que iba contra la creencia ampliamente extendida durante muchos años, según la

cual el calor era un tipo de fluido, llamado calórico —de donde deriva la palabra caloría—, que circulaba desde las áreas de alta concentración a las de baja y no podía crearse ni destruirse. Joule comprobó, sin embargo, que el calor se producía de muchas formas, lo que indicaba que su naturaleza era distinta. Por ejemplo, estudió las caídas de agua y comprobó que el agua en la parte inferior estaba más caliente que en la superior, de lo que dedujo que la diferencia de energía potencial gravitatoria entre la zona superior e inferior de la cascada se convertía en calor. También vio que, cuando agitaba el agua con una rueda de paletas —un experimento muy famoso—, aumentaba la temperatura del agua, y en 1881 obtuvo resultados extraordinariamente precisos para la conversión de la energía cinética de la rueda de paletas en calor.



En este experimento, Joule conectó una serie de paletas en un contenedor de agua a una polea y una cuerda de la que colgaba un peso. Cuando este bajaba, la cuerda hacía girar el eje de las paletas, que rotaban en el agua. Más técnicamente, hacía descender una masa m una distancia h. La variación de energía potencial era de

mgh, que el artilugio convertía en energía rotacional (cinética) de la paleta, que calentaba el agua. Véase supra una ilustración del aparato.

Lo que hace que el experimento fuese tan brillante es que Joule consiguió calcular la cantidad de energía exacta que estaba transfiriendo al agua (que era igual a mgh). El peso bajaba lentamente, porque el agua impedía que la paleta girase rápido. Por lo tanto, el peso llegaba al suelo con una velocidad despreciable, por lo que toda la energía potencial gravitatoria disponible se transfería al agua.

¿Cuánto es un julio? Si dejas caer un objeto de un kilogramo 0,1 metros (10 centímetros), la energía cinética de ese objeto ha aumentado en mgh, que es aproximadamente un julio. Puede que no parezca mucho, pero los julios enseguida van sumando. Para lanzar una bola de béisbol a poco menos de 160 kilómetros por hora, un jugador profesional necesita 140 julios de energía, que es aproximadamente la misma cantidad necesaria para levantar un metro entero un bushel de manzanas de 140 gramos.[43]

Ciento cuarenta julios de energía cinética pueden ser suficientes para matarte si la energía se libera rápido y de forma concentrada. Si se extiende durante una hora o dos, ni siquiera la notarás. Si esos julios te golpeasen mediante un golpe fuerte con una almohada no te matarían, pero si se concentrasen, por ejemplo, en una bala, una piedra o una pelota de béisbol en una pequeña fracción de segundo, la historia sería muy distinta.

Esto nos lleva de nuevo a las bolas de demolición. Supongamos que tienes una de 1.000 kilogramos (una tonelada) y que la dejas caer a una distancia vertical de 5 metros. Unos 50.000 julios ($mgh = 1.000 \times 10 \times 5$) se convertirían en energía cinética. Es una cantidad importante, sobre todo si se libera en un lapso muy breve. Utilizando la ecuación para la energía cinética, podemos calcular también la velocidad. En la parte inferior de su oscilación, la bola se movería a una velocidad de 10 metros por segundo (36 kilómetros por hora), que es bastante alta para una bola de una tonelada. Para ver una energía de esta magnitud en acción, puedes echar un vistazo a este asombroso vídeo en el que una bola de demolición golpea una furgoneta que había entrado por error en una zona de obras en Manhattan,

---

[43] Para simplificar, he dado a g un valor de 10 metros por segundo al cuadrado, una práctica habitual entre los físicos.

volteándola como si fuese de juguete[44].

¿Cuánta energía necesitamos extraer de la comida?

Podemos llegar a apreciar los asombrosos logros de la conversión de energía, que mantienen en pie nuestra civilización, si pensamos en las cantidades de julios que intervienen en los más básicos de nuestros procesos vitales. Piensa, por ejemplo, que en un día un cuerpo humano genera unos 10 millones de julios de calor corporal. A menos que tengas fiebre, tu cuerpo está a unos 37 grados Celsius e irradia calor en forma de radiación infrarroja a un ritmo, en promedio, de unos 100 julios por segundo; lo que supone, muy aproximadamente, unos 10 millones de julios al día. Sin embargo, esto depende de la temperatura del aire y del tamaño del ser humano. Cuanto más grande es una persona, más energía irradia por segundo. Puedes compararlo con la energía que irradia una bombilla; 1 vatio equivale a un gasto de 1 julio por segundo, así que 100 julios por segundo son 100 vatios, lo que significa que, de media, la gente irradia aproximadamente lo mismo que una bombilla de 100 vatios. No estás tan caliente como una bombilla porque tu calor se distribuye sobre un área mucho mayor. Si tienes en cuenta que una manta eléctrica solo produce 50 vatios, entenderás por qué, como seguro que ya sabías, en invierno es mucho más agradable tener al lado en la cama un ser humano que una manta eléctrica.

Existen decenas de unidades de energía diferentes: BTU[45] para el aire acondicionado; kilovatios-hora para la electricidad; electronvoltios para la física atómica; ergios para los astrónomos. Una BTU son unos 1,055 julios; un kilovatio-hora equivale a $3{,}6 \times 10^6$ julios; un electronvoltio son $1{,}6 \times 10^{-19}$ julios; un ergio son 10^{-7} julios. Una unidad de energía muy importante que a todos nos resulta familiar es la caloría, que equivale a cerca de 4,2 julios. Como nuestros cuerpos generan aproximadamente 10 millones de julios al día, gastamos algo más de 2 millones de calorías al día. Pero ¿cómo es posible? Se supone que tenemos que ingerir solo unas 2.000 calorías al día. Cuando lees caloría en las cajas de comida,

[44] www.lionsdenu.com/wreckingball-vs-dodge-mini-van/

[45] British Thermal Unit es una unidad de energía utilizada sobre todo en Estados Unidos, equivalente a la cantidad de energía necesaria para calentar una libra (0,454 kg) de agua de 39 a 40 grados Fahrenheit (3,8 a 4,4 grados centígrados). (*N. del T.*)

lo que realmente significa es kilocaloría, 1.000 calorías, algo que a veces se indica escribiendo la palabra con C mayúscula. Se hace por comodidad, porque una caloría es una unidad muy pequeña: la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua. Así que, para irradiar 10 millones de julios al día, tienes que ingerir unas 2.400 kilocalorías (o Calorías) de comida al día. Si comes mucho más, lo acabas pagando, tarde o temprano. Las matemáticas en eso son implacables, como muchos de nosotros sabemos aunque tratemos de ignorarlo.

¿Y toda nuestra actividad física a lo largo del día? ¿No tenemos que comer también para sustentarla? Subir y bajar escaleras, por ejemplo, hacer cosas en casa, o pasar el aspirador. Las tareas domésticas pueden ser agotadoras, así que debemos de gastar mucha energía, ¿verdad? Te sorprenderá, pero es muy decepcionante: el tipo de actividad que tú y yo realizamos en un día supone una cantidad de energía tan vergonzosamente pequeña que puedes despreciarla por completo a la hora de equilibrar lo que ingieres con lo que gastas, a menos que vayas al gimnasio y entrenes realmente duro.

Imagínate que subes tres pisos de escaleras hasta tu oficina en lugar de coger el ascensor. Conozco a mucha gente que se siente mejor consigo misma por subir por las escaleras, pero haz cálculos: supongamos que esos 3 metros suman una altura de 10 metros, y que los subes tres veces al día. Como no te conozco, digamos que pesas unos 70 kilogramos. ¿Cuánta energía hace falta para subir esas escaleras tres veces? Seamos más ambiciosos, ¿qué tal cinco veces al día? Supongamos que te lo tomas realmente en serio: cinco veces al día, tres pisos. La energía que tendrías que producir es mgh, donde h es la diferencia de altura entre el primer piso y el cuarto. Multiplicamos los 10 kilogramos (m) por 10 metros por segundo al cuadrado (g) por 10 metros (h) y por 5, ya que lo haces cinco veces al día; en total, 35.000 julios. Compáralo con los 10 millones de julios que tu cuerpo irradia cada día. ¿Crees que tienes que comer un poco más por esos míseros 35.000 julios? Olvídalo, no es nada: solo un tercio del 1 por ciento del total. Pero eso no impide que los vendedores suelten absurdos reclamos sobre aparatos para quemar calorías. Esta mañana he abierto un catálogo de compra por correo de aparatos de gama alta y he encontrado un anuncio de «pesas portátiles» que garantizan una «combustión de

calorías adicionales durante la actividad diaria normal». Quizá disfrutes al sentir que tus brazos y piernas son más pesados (aunque no tengo claro por qué), y llevarlas hará que generes más músculo, ¡pero no esperes perder mucho peso con este tipo de castigo!

Un lector avispado se dará cuenta, por supuesto, de que no podemos subir las escaleras cinco veces sin volver a bajar. Cuando bajas, esos 35.000 julios se liberan en forma de calor en tus músculos, tus zapatos y el suelo. Si saltases, toda la energía potencial gravitatoria que has acumulado al subir las escaleras se convertiría en energía cinética (y, probablemente, te romperías algún hueso). Así que, aunque has tenido que aportar 35.000 julios para llegar ahí, no los recuperas en una forma útil cuando bajas, a menos que puedas construir un ingenioso aparato para convertir tu energía cinética en electricidad, por ejemplo (que es exactamente lo que hacen los coches híbridos).

Veámoslo de otra forma. Supón que distribuyes las subidas de escaleras a lo largo de diez horas al día, quizá una o dos veces por la mañana, otras dos por la tarde y una última vez al atardecer. En esas diez horas, 36.000 segundos, has generado unos 35.000 julios, lo que, siendo sinceros, es ridículamente escaso (una media de un vatio). Compáralo con tu cuerpo, que irradia una media de 100 julios por segundo, 100 vatios. Así que, como puedes ver, la energía que quemas al subir las escaleras es completamente despreciable. No te ayudará a mantener la línea.

No obstante, en lugar de las escaleras imagina que escalas una montaña de 1.500 metros. Para hacerlo, tendrías que generar y gastar un millón de julios además del consumo normal. Un millón ya no es despreciable frente a 10 millones. Tras subir la montaña te sentirás legítimamente hambriento, y entonces sí que necesitarás más comida. Si subes la montaña en cuatro horas, la potencia media que habrás generado (la potencia se mide en julios por segundo) es importante, un promedio de 70 vatios durante esas cuatro horas. El cuerpo enviará entonces un mensaje tajante a tu cerebro: «Necesito comer más».

Quizá pienses que, como has utilizado un 10 por ciento de energía adicional, además de los 10 millones julios normales, solo tendrías que comer un 10 por ciento más de lo que comes normalmente (unas 240 Calorías), porque es bastante evidente que un millón es solo el 10 por ciento de 10 millones. Pero eso no es del

todo cierto, algo que tal vez ya sabías de forma intuitiva, porque el sistema corporal de conversión de comida-energía no es especialmente eficiente, desde un punto de vista físico. Lo máximo que consiguen los seres humanos, de media, es una eficiencia del 40 por ciento (es decir, como máximo convertimos un 40 por ciento de nuestra ingesta calórica en energía útil). El resto se pierde como calor (tiene que ir a alguna parte, ya que la energía se conserva). Así que, para generar un millón de julios adicional para sustentar tu costumbre de subir montañas, tendrás que ingerir unas 600 Calorías más, el equivalente aproximado a una comida extra al día.

¿De dónde sacaremos lo que necesitamos?

La cantidad de energía necesaria para tus actividades diarias me resulta asombrosa. Imagina que quiero darme un baño y quiero calcular cuánta energía hace falta para calentar el agua. La ecuación es muy sencilla: la cantidad de energía necesaria, en kilocalorías, es la masa del agua, en kilogramos, multiplicada por la variación de temperatura, en grados Celsius. Así que, como en una bañera caben unos 100 kilogramos de agua, y si suponemos que el aumento de temperatura es de unos 50 grados Celsius, hacen falta aproximadamente 5.000 kilocalorías de energía, o 20 millones de julios, para producir un baño caliente. Los baños son muy agradables, pero necesitan bastante energía. Lo chocante es que la energía es tan barata en Estados Unidos que un baño te costará solo alrededor de 1,50 dólares. Hace doscientos años, el agua para el baño se calentaba quemando madera. La leña contiene unos 15 millones de julios por kilogramo, así que una familia tendría que extraer toda la energía de un kilo de leña para un solo baño. Mientras que las estufas modernas queman con una eficiencia del 70 por ciento, una hoguera, o las estufas de hace doscientos años, calientan con una eficiencia mucho menor, y durante un período de tiempo mucho más largo, por lo que probablemente serían necesarios entre 5 y 10 kilos de madera para calentar esa bañera de 100 litros. No resulta sorprendente que nuestros antepasados se bañasen mucho menos que nosotros, ni que una familia entera utilizase la misma agua.

A continuación, daré unas cifras para que te hagas una idea del consumo de energía en un hogar. Un radiador consume aproximadamente 1.000 vatios, de modo que en una hora gastas alrededor de 3,6 millones de julios, o, utilizando la unidad común

de medida de la electricidad, 1 kilovatio-hora. Una caldera eléctrica en un clima frío puede consumir aproximadamente 2.500 vatios. Un aparato de aire acondicionado consume normalmente 1.500 vatios, mientras que un sistema centralizado de refrigeración consume entre 5 y 20 kilovatios. A unos 175 grados Celsius, un horno eléctrico consume 2 kilovatios, mientras que un lavavajillas consume 3,5 kilovatios. He aquí una comparación que te interesará: un ordenador de sobremesa con un monitor de rayos catódicos de 17 pulgadas consume entre 150 y 350 vatios, mientras que en reposo el ordenador y el monitor consumen solo 20 vatios, o menos. En el extremo inferior, un despertador con radio consume 4 vatios. Como una pila alcalina de 9 voltios almacena un total de unos 18.000 julios, o 5 vatios-hora, podría alimentar el despertador durante algo más de una hora.

En la Tierra vivimos más de 6.500 millones de personas y consumimos alrededor de 5×10^{20} julios de energía al año. Cuarenta años después del embargo de petróleo por parte de la OPEP, el 85 por ciento aún proviene de combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Estados Unidos, con poco más de trescientos millones de habitantes, una vigésima parte de la población mundial, es responsable de una quinta parte del consumo mundial de energía. No podemos negarlo, somos unos derrochadores de energía, unos grandes derrochadores de energía. Esta es una de las razones por las que me alegré de que el presidente Obama nombrase al premio Nobel de Física Steven Chu como su secretario de Energía. Si queremos resolver nuestros problemas energéticos, hemos de tener en cuenta la física de la energía.

Por ejemplo, hay muchas esperanzas puestas en el potencial de la energía solar, y yo estoy completamente a favor de impulsarla decididamente. Pero hemos de ser conscientes de las limitaciones a las que nos enfrentamos. No hay duda de que el Sol es una maravillosa fuente de energía: genera una potencia de 4×10^{26} vatios —4×10^{26} julios por segundo—, en su mayor parte en las zonas visible e infrarroja del espectro. Como conocemos la distancia entre la Tierra y el Sol (150 millones de kilómetros), podemos calcular cuánta de esa potencia llega a la Tierra. Son unos $1,7 \times 10^{17}$ vatios, es decir, unos 5×10^{24} julios al año. Si orientas un panel de un metro cuadrado directamente hacia el Sol (¡sin nubes!), recibirá aproximadamente 1.200 vatios (he supuesto que la atmósfera refleja o absorbe un 15 por ciento de la potencia que llega). Un número redondo con el que trabajar es 1.000 vatios (1

kilovatio) por cada metro cuadrado orientado directamente hacia el Sol en ausencia de nubes.

El potencial de la energía solar podría parecer enorme. Serían necesarios unos 2×10^{10} metros cuadrados para recoger la energía solar suficiente para cubrir las necesidades energéticas mundiales, lo que equivale a unas cinco veces la superficie de mi país natal, Holanda (que no es ni remotamente un país muy grande).

Sin embargo, esto tiene truco. Aún no hemos tenido en cuenta el hecho de que hay días y noches; hemos asumido que el Sol siempre está ahí. También están las nubes. Y, si los paneles solares no son móviles, no pueden estar orientados hacia el Sol todo el tiempo. También influye tu posición en la Tierra: los países en el ecuador reciben más energía (son más cálidos, en definitiva) que los más septentrionales (en el hemisferio norte) o australes (en el hemisferio sur).

También hemos de tener en cuenta la eficiencia de los dispositivos con los que se recoge la energía solar. Existen muchas tecnología diferentes, cada vez más, pero la máxima eficiencia real de los paneles solares de silicio (a diferencia de los fabricados con materiales caros) es de alrededor del 18 por ciento. Si se utiliza la energía solar directamente para calentar agua (sin convertirla antes en energía eléctrica), la eficiencia es mucho mayor. En comparación, una caldera de gasóleo, incluso una que no sea muy nueva, puede alcanzar fácilmente una eficiencia de entre el 75 y el 80 por ciento. Así que, si tenemos en cuenta todos estos factores limitadores, sería necesaria más bien una superficie de un billón de metros cuadrados, unas tres veces más grande que Alemania. Y ni siquiera hemos contemplado el coste de construir los sistemas para recoger y convertir toda esa energía solar en electricidad. Hoy en día, es aproximadamente el doble más costoso extraer energía del Sol que hacerlo de combustibles fósiles. No es solo que su coste sería estratosférico, sino que un proyecto así está en la actualidad fuera de nuestro alcance tanto tecnológica como políticamente. Por eso, durante un tiempo aún, la energía solar tendrá un papel creciente pero relativamente pequeño en la economía mundial.

Por otra parte, si empezamos ahora, podemos hacer enormes progresos en las próximas cuatro décadas. Greenpeace y la Agencia Internacional de la Energía estimaron en 2009 que, con grandes subsidios gubernamentales, la energía solar

podría «llegar a satisfacer el 7 por ciento de las necesidades energéticas mundiales en 2030 y un 25 por ciento en 2050». La revista Scientific American afirmó hace varios años que un programa de choque y más de 400.000 millones de dólares en subsidios durante los próximos cuarenta años permitirían que la energía solar produjese el 69 por ciento de la electricidad en Estados Unidos y el 35 por ciento de sus necesidades energéticas totales.

¿Qué hay de la energía eólica? Al fin y al cabo, la energía eólica se ha venido utilizando desde que los humanos izaron las primeras velas al viento. Los molinos de viento existían mucho antes de la energía eléctrica, quizá incluso mil años antes. Y el principio de obtener energía de la naturaleza y convertirla en un tipo distinto de energía para el uso humano era exactamente el mismo en la China del siglo XIII, en el Irán aún anterior o en la Europa del siglo XII. En todos estos lugares, los molinos ayudaban a realizar algunas de las tareas más duras para los seres humanos: extraer agua para beber o para la irrigación de las cosechas o moler grano entre grandes piedras para hacer harina. Produzca o no electricidad, la energía eólica es necesaria para mover un molino.

Como productora de electricidad, la energía eólica está fácilmente disponible, es completamente renovable y no provoca la emisión de gases de efecto invernadero. En 2009, la producción mundial de energía eólica fue de 340 teravatios-hora (un teravatio es un billón de vatios-hora), que es alrededor del 2 por ciento del consumo eléctrico mundial. Y crece rápidamente; de hecho, la producción de electricidad a partir del viento se ha multiplicado por dos en los últimos tres años.

¿Y la energía nuclear? La energía nuclear es mucho más abundante de lo que solemos pensar. De hecho, está por todas partes, siempre. El vidrio de las ventanas contiene potasio 40, que es radiactivo y tiene un vida media de 1.200 millones de años; la energía que produce su desintegración contribuye a calentar el núcleo terrestre. Todo el helio de la atmósfera se produjo por la desintegración radiactiva de isótopos que existían de forma natural en la Tierra. Lo que llamamos desintegración alfa consiste en la emisión de un núcleo de helio por parte de un núcleo más grande e inestable.

Tengo una colección muy especial y muy grande de Fiestaware, que es una vajilla americana —platos grandes y pequeños, cuencos y tazas— diseñada y fabricada a

partir de los años treinta. Me encanta llevar algunos de estos platos a clase y enseñárselos a los alumnos. Los naranjas en particular, llamados «Fiesta Red», contienen óxido de uranio, que era un componente habitual de los esmaltes cerámicos. Acerco un plato a un contador Geiger y empieza a pitar aceleradamente. El uranio del plato es radiactivo y emite rayos gamma. Tras esta demostración, siempre invito a los alumnos a cenar a mi casa, pero curiosamente nunca ha venido nadie.

La fisión, o división de núcleos pesados, genera grandes cantidades de energía, ya sea en un reactor nuclear, en que las reacciones en cadena que dividen núcleos de uranio-235 están controladas, o en una bomba nuclear, donde las reacciones en cadena se producen sin control y provocan una inmensa destrucción. Una central nuclear que produce alrededor de 1.000 millones de julios por segundo (10^9 vatios, o 1.000 megavatios) consume aproximadamente 10^{27} núcleos de uranio-235 al año, que equivalen a solo unos 400 kilogramos.

No obstante, solo el 0,7 por ciento del uranio natural es uranio 235 (el 99,3 por ciento es uranio-238). Por lo tanto, las centrales nucleares utilizan uranio enriquecido; el grado de enriquecimiento varía, pero una cifra promedio es el 5 por ciento. Esto significa que, en lugar de un 0,7 por ciento de uranio-235, sus barras de combustible contienen un 5 por ciento. Así, una central nuclear de 1.000 megavatios consume alrededor de 8.000 kilogramos de uranio al año, de los cuales unos 400 kilogramos son de uranio-235. En comparación, una central eléctrica de 1.000 megavatios de combustible fósil consume alrededor de 5.000 millones de kilogramos de carbón al año.

El enriquecimiento del uranio es costoso; se realiza en miles de centrifugadoras. El uranio para uso militar se enriquece al menos hasta el 85 por ciento en uranio-235. Quizá ahora entiendas por qué al mundo le preocupan mucho los países que enriquecen uranio en un grado indeterminado y que no se puede verificar.

En las centrales nucleares, el calor que generan las reacciones en cadena controladas transforma el agua en vapor, que mueve una turbina y produce electricidad. La eficiencia de una central nuclear para convertir la energía nuclear en electricidad es de alrededor del 35 por ciento. Si leemos que una central nuclear produce 1.000 megavatios, no sabemos si son 1.000 megavatios de potencia total

(de la que 1/3 se convierte en energía eléctrica y 2/3 se pierden en forma de calor), o si es todo potencia eléctrica, en cuyo caso la potencia total de la planta es de unos 3.000 megavatios. ¡Hay mucha diferencia! Ayer leí en el periódico que Irán en breve va a poner en funcionamiento una central nuclear que producirá 1.000 megavatios de electricidad (¡eso es hablar claro!).

A medida que la preocupación por el calentamiento global ha aumentado espectacularmente en los últimos años, la opción de la energía nuclear está volviendo a ponerse de moda (a diferencia de las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles, las centrales nucleares no emiten muchos gases de efecto invernadero). En Estados Unidos ya hay más de cien centrales nucleares, que producen alrededor del 20 por ciento de la energía que consumimos. En Francia, esta cifra es de cerca del 75 por ciento. En todo el mundo, aproximadamente un 15 por ciento de la energía eléctrica total que se consume se produce en centrales nucleares. Distintos países siguen diferentes políticas respecto a la energía nuclear, pero para construir más centrales será necesaria mucha persuasión política, debido al temor que generaron los famosos accidentes nucleares de Three Mile Island, Chernóbil y Fukushima. Las centrales son también muy caras: las estimaciones van desde los 5.000 a los 10.000 millones de dólares en Estados Unidos, y alrededor de 2.000 millones de dólares en China. Por último, el almacenamiento de los residuos radiactivos de las centrales nucleares sigue siendo un enorme problema, tanto tecnológico como político.

En la Tierra aún disponemos de enormes cantidades de combustible fósil, pero lo estamos consumiendo muchísimo más rápido de lo que la naturaleza es capaz de crearlo. Y la población mundial sigue creciendo, al tiempo que en muchos de los países con mayor crecimiento, como China y la India, tiene lugar un desarrollo basado en un consumo intenso de energía a un ritmo extremadamente rápido. No se puede negar que estamos inmersos en una crisis energética muy seria. ¿Qué hemos de hacer al respecto?

Una cosa importante es ser más conscientes de la cantidad de energía que consumimos diariamente, y consumir menos. Creo que mi propio consumo de energía es bastante modesto, aunque, como vivo en Estados Unidos, estoy seguro de que consumo cuatro o cinco veces más que el promedio mundial per cápita.

Utilizo electricidad; la calefacción, el agua caliente y la cocina de mi casa funcionan con gas; uso mi coche (no mucho, pero sí que gasto algo de gasolina). Sumándolo todo, creo que (en 2009) consumí de media unos 100 millones de julios (30 kilovatios-hora) al día, de los cuales aproximadamente la mitad eran energía eléctrica. Esta energía equivale a tener a unos doscientos esclavos trabajando como perros para mí doce horas al día. Piénsalo. En la Antigüedad solo la realeza más opulenta vivía así. Qué lujosos e increíbles son estos tiempos que vivimos: doscientos esclavos trabajan para mí cada día, doce horas al día sin parar, todo para que pueda vivir como vivo. Por 1 kilovatio-hora de electricidad, que son 3,6 millones de julios, pago unos míseros 25 centavos. El total de mi factura energética (he incluido el gas y la gasolina, ya que su precio por unidad no es muy distinto) para esos doscientos esclavos fue, de media, de unos 225 dólares al mes; ¡un dólar por esclavo al mes! Es imprescindible un cambio en nuestras conciencias, pero eso no sería más que el principio.

Cambiar nuestras costumbres y utilizar aparatos más eficientes energéticamente, como lámparas fluorescentes compactas (CFL: compact fluorescent lights) en lugar de lámparas incandescentes, puede ser un gran paso. Pude comprobar de una forma bastante espectacular el cambio que yo podía generar. El consumo eléctrico en mi casa de Cambridge fue de 8.860 kilovatios-hora en 2005 y 8.317 en 2006. Esto incluía el alumbrado, el aire acondicionado, el lavavajillas y la secadora (el agua caliente, la cocina y la calefacción funcionan con gas). A mediados de diciembre de 2006, mi hijo Chuck (que fundó New Generation Energy) me hizo un regalo maravilloso: cambió todas las bombillas incandescentes de mi casa (setenta y cinco en total) por bombillas fluorescentes. Mi consumo de electricidad bajó espectacularmente en 2007 a 5.251 kilovatioshora, 5.184 en 2008 y 5.226 en 2009. Este descenso del 40 por ciento en mi consumo de energía redujo mi factura anual en unos 850 dólares. Puesto que la iluminación por sí sola supone alrededor del 12 por ciento del consumo eléctrico residencial en Estados Unidos y el 25 por ciento del consumo comercial, es claramente el camino a seguir.

En una línea similar, el gobierno australiano inició en 2007 sus planes para sustituir todas las bombillas incandescentes en el país con fluorescentes, lo que no solo reduciría sustancialmente la emisión de gases de efecto invernadero, sino que

también rebajaría la factura de la electricidad en todos los hogares (como me pasó a mí). Pero tenemos que hacer más.

Creo que la única forma de que sobrevivamos manteniendo algo parecido a nuestra calidad de vida actual pasa por hacer de la fusión nuclear una fuente de energía fiable y seria. No la fisión —en la que núcleos de uranio y plutonio se rompen en pedazos y emiten energía, que alimenta los reactores nucleares—, sino la fusión, en la que se combinan átomos de hidrógeno para formar helio, liberando energía. La fusión es el proceso que sustenta las estrellas (y las bombas termonucleares), es el proceso de producción de energía más potente (por unidad de masa) que conocemos (con la excepción de la colisión de materia y antimateria, que no permite la generación de energía).

Por motivos bastante complicados, solo ciertos tipos de hidrógeno (deuterio y tritio) son adecuados para los reactores de fusión. El deuterio (cuyo núcleo contiene un neutrón y un protón) se obtiene fácilmente; aproximadamente, uno de cada seis mil átomos de hidrógeno en la Tierra es deuterio. Puesto que en los océanos disponemos de unos 1.000 millones de kilómetros cúbicos de agua, el suministro de deuterio es prácticamente ilimitado. El tritio no existe de forma natural en la Tierra (es radiactivo, con una vida media de unos doce años), pero es fácil producirlo en los reactores nucleares.

El verdadero problema es cómo crear un reactor de fusión práctico, controlado y que funcione. No está nada claro que lleguemos a lograrlo. Para que se fusionen núcleos de hidrógeno, tenemos que producir, aquí en la Tierra, temperaturas del orden de los 100 millones de grados, cercanas a las del núcleo de las estrellas.

Los científicos han dedicado mucho esfuerzo durante muchos años a la fusión, y creo que más aún ahora que cada vez más gobiernos parecen estar sinceramente convencidos de que la crisis energética es real. No cabe duda de que es un gran problema, pero soy optimista. Al fin y al cabo, a lo largo de mi vida profesional he visto cambios totalmente alucinantes, que han trastocado por completo la idea que teníamos del universo. La cosmología, por ejemplo, que era en su mayor parte especulación con un poco de ciencia, se ha convertido en una verdadera ciencia experimental, y sabemos muchísimo del origen del universo. De hecho, estamos viviendo lo que muchos llaman la era dorada de la cosmología.

Cuando comencé a investigar sobre cosmología de rayos X, sabíamos de la existencia de una docena de fuentes de rayos X en el espacio profundo. Ahora conocemos muchas decenas de miles. Hace cincuenta años, la capacidad de computación de tu ordenador portátil de dos kilos habría ocupado la mayor parte del edificio del MIT donde está mi despacho. Hace cincuenta años, los astrónomos utilizaban telescopios ópticos y de radio situados en la superficie terrestre; eso era todo lo que había. Ahora no solo tenemos el telescopio espacial Hubble, sino que disponemos de una serie de observatorios de rayos X en satélites, de observatorios de rayos gamma, y estamos utilizando y construyendo nuevos observatorios de neutrinos. Hace cincuenta años ni siquiera estaba del todo claro que hubiese habido un big bang. Ahora no solo creemos que sabemos cómo era el universo en la primera millonésima de segundo tras el big bang, sino que estudiamos con confianza objetos astronómicos de más de 13.000 millones de años, objetos formados durante los primeros quinientos millones de años tras la explosión que creó nuestro universo. En este ambiente de inmensos descubrimientos y transformaciones, ¿cómo puedo dejar de pensar que los científicos no resolverán el problema de la fusión controlada? No quiero restar importancia a las dificultades, o a la necesidad de resolverlo pronto, pero creo que es solo cuestión de tiempo.

Capítulo 10

¡Rayos X del espacio exterior!

Los cielos siempre han supuesto un desafío, tanto por el día como de noche, para los humanos que intentaban comprender el mundo que nos rodea; esta es una de las razones por las que la astronomía siempre ha fascinado a los físicos. «¿Qué es el Sol?», nos preguntamos. «¿Por qué se mueve?» ¿Y la Luna, los planetas, las estrellas? Piensa en lo que tardaron nuestros antepasados en entender que los planetas eran distintos de las estrellas; que orbitaban alrededor del Sol; y que esas órbitas se podían observar, representar, explicar y predecir. Muchos de los científicos más importantes de los siglos XVI y XVII —entre ellos, Nicolás Copérnico, Galileo Galilei, Tycho Brahe, Johannes Kepler o Isaac Newton— se vieron obligados a volver su mirada hacia los cielos para desentrañar estos misterios nocturnos. Imagina la emoción que debió de sentir Galileo cuando apuntó su telescopio hacia Júpiter, poco más que un punto de luz, ¡y descubrió que cuatro pequeñas lunas orbitaban a su alrededor! Y, al mismo tiempo, lo frustrante que debió de ser saber tan poco de las estrellas que aparecían noche tras noche. Sorprendentemente, tanto Demócrito, en la Grecia antigua, como el astrónomo Giordano Bruno, en el siglo XVI, propusieron que las estrellas eran como nuestro propio Sol, pero no disponían de pruebas para demostrar que tenían razón. ¿Qué podían ser? ¿Qué hacía que se mantuviesen en el cielo? ¿A qué distancia estaban? ¿Por qué había unas más brillantes que otras? ¿Por qué tenían distintos colores? ¿Y qué era esa ancha franja de luz que atravesaba el cielo de un extremo otro en una noche clara?

La historia de la astronomía y la astrofísica desde aquellos tiempos ha sido la de la búsqueda de respuestas a esas preguntas, y a las nuevas preguntas que surgieron cuando empezamos a obtener algunas respuestas. Durante los últimos cuatrocientos años, lo que los astrónomos han podido ver ha dependido, evidentemente, de la potencia y la sensibilidad de sus telescopios. La gran excepción fue Tycho Brahe, que realizó a simple vista, utilizando un equipo muy sencillo, observaciones muy detalladas que permitieron que Kepler hiciese tres descubrimientos muy importantes, conocidos como las leyes de Kepler.

Durante la mayor parte de ese período, solo disponíamos de telescopios ópticos. Sé

que esto le sonará raro a quien no sea astrónomo. Cuando oyes «telescopio», piensas automáticamente en un «tubo con lentes y espejos por el que miras», ¿verdad? ¿Cómo podría un telescopio no ser óptico? Cuando el presidente Obama celebró una noche de astronomía en octubre de 2009, se montaron un montón de telescopios en el jardín de la Casa Blanca y todos ellos eran telescopios ópticos.

Pero desde los años treinta, cuando Karl Jansky descubrió las ondas de radio procedentes de la Vía Láctea, los astrónomos han buscado la manera de ampliar el rango de la radiación electromagnética a través de la cual observan el universo. Han buscado (y descubierto) radiación de microondas (ondas de radio de alta frecuencia), infrarroja y ultravioleta (con frecuencias justo por debajo y por encima de las de la luz visible), rayos X y rayos gamma. Para detectar esta radiación, hemos creado una serie de telescopios con diseños especiales —como los montados en los satélites de rayos X y de rayos gamma— que nos permiten ver el universo con mayor profundidad y amplitud. Incluso existen telescopios subterráneos de neutrinos, incluido uno que se está construyendo actualmente en el Polo Sur llamado, acertadamente, IceCube, «cubito de hielo».

Durante los últimos cuarenta y cinco años —toda mi vida en la astrofísica— he trabajado en el campo de la astronomía de rayos X, descubriendo nuevas fuentes de rayos X y desarrollando explicaciones para los muchos fenómenos distintos que observamos. Como he escrito antes, el inicio de mi carrera coincidió con los embriagadores y emocionantes primeros años de este campo, en el que me sumergí durante las cuatro décadas siguientes. La astronomía de rayos X cambió mi vida y, lo que es más importante, cambió la propia astronomía. Este capítulo y los cuatro siguientes te llevarán en un recorrido por el universo de los rayos X, desde el punto de vista de alguien que ha trabajado y vivido en ese universo durante toda su carrera científica. Empecemos con los propios rayos X.

¿Qué son los rayos X?

Los rayos X tienen un nombre de sonido exótico, que recibieron porque eran «una incógnita» (como la x en una ecuación), pero son simplemente fotones —radiación electromagnética— en la parte del espectro electromagnético que no podemos ver entre la luz ultravioleta y los rayos gamma. En holandés y en alemán no se llaman

rayos X, sino que reciben su nombre del físico alemán Wilhelm Roentgen, que los descubrió en 1895. Los distinguimos de la misma manera que identificamos a otros miembros del espectro, de tres formas diferentes pero relacionadas: por la frecuencia (el número de ciclos por segundo, expresada en hercios), por la longitud de onda (la extensión de una onda individual, en metros o, en este caso, nanómetros) o por la energía (en electronvoltios, eV, o miles de electronvoltios, keV).

Veamos unas cuantas cifras para poder hacer comparaciones. La luz verde tiene una longitud de onda de unas 500 milmillonésimas de metro, o 500 nanómetros, y una energía de unos 2,5 electronvoltios. El fotón de rayos X de más baja energía tiene unos 100 eV, cuarenta veces más que un fotón de luz verde, con una longitud de onda de unos 12 nanómetros. Los rayos X de más alta energía tienen unos 100 keV y longitudes de onda de unos 0,012 nanómetros. (Tu dentista utiliza rayos X de hasta 50 keV.) En el otro extremo del espectro electromagnético, las emisoras de radio en Estados Unidos emiten en la banda de AM entre 520 kilohercios (longitud de onda de 577 metros) y 1.710 kilohercios (longitud de onda de 175 metros, casi dos campos de fútbol). Su energía es mil millones de veces menor que la de la luz verde y un billón de veces menor que la de los rayos X.

La naturaleza produce rayos X de distintas maneras. La mayoría de los átomos radiactivos los emiten de forma natural durante la desintegración nuclear. Lo que sucede es que los electrones caen desde un estado de mayor a uno de menor energía y la diferencia de energía se emite como un fotón de rayos X. Estos fotones tienen energías muy discretas, ya que los niveles de energía de los electrones están cuantizados. También, cuando los electrones pasan a altas velocidades cerca de los núcleos atómicos, cambian de dirección y emiten parte de su energía en forma de rayos X. Este tipo de emisión de rayos X, muy habitual en astronomía y en cualquier aparato de rayos X de uso médico o dental, tiene un nombre complicado en alemán, bremsstrahlung, que significa literalmente «radiación de frenado»[46]. En algunos aparatos médicos también se pueden producir rayos X de energías discretas, pero en general predomina el bremsstrahlung (que produce un espectro continuo de

[46] Se pueden ver varias interesantes versiones animadas de la producción de rayos X por bremsstrahlung en www.youtube.com/watch?v= 3fe6rHnhkuY.

rayos X). Cuando los electrones de alta energía se mueven en espiral alrededor de las líneas de un campo magnético, su dirección cambia continuamente y, por tanto, también emitirán parte de su energía en forma de rayos X; es lo que se llama radiación de sincrotrón o bremsstrahlung magnético (es lo que sucede en la nebulosa del Cangrejo; véase infra).

La naturaleza también produce rayos X cuando calienta la materia densa a temperaturas altísimas, de millones de grados Kelvin. Es lo que se llama radiación del cuerpo negro (véase el capítulo 14). La materia solo alcanza estas temperaturas en circunstancias muy extremas, como explosiones de supernovas —las espectaculares explosiones en las que mueren algunas estrellas gigantes— y cuando el gas cae a muy altas velocidades hacia un agujero negro o una estrella de neutrones (añadiré algo más al respecto en el capítulo 13, ¡lo prometo!). El Sol, por ejemplo, cuya temperatura en la superficie es de unos 6.000 grados Kelvin, irradia algo menos de la mitad de su energía (46 por ciento) en forma de luz visible. La mayor parte del resto es radiación infrarroja (49 por ciento) y ultravioleta (5 por ciento). Su temperatura no se acerca ni remotamente a la necesaria para emitir rayos X. El Sol sí que emite cierta cantidad de rayos X, cuya física no se entiende del todo, pero solo una millonésima parte de toda la energía que irradia. Tu propio cuerpo emite radiación infrarroja (véase el capítulo 9); no tiene temperatura suficiente para emitir luz visible.

Uno de los aspectos más interesantes —y útiles— de los rayos X es que determinados tipos de materia, como los huesos, los absorben más que otros, como el tejido blando, lo que explica por qué una radiografía de tu boca o tu mano presenta zonas claras y oscuras. Si te han hecho alguna radiografía, también habrás vivido la experiencia de ponerte un delantal de plomo para proteger el resto de tu cuerpo, ya que la exposición a los rayos X puede incrementar el riesgo de padecer cáncer. Por eso en general es bueno que nuestra atmósfera absorba tanto los rayos X. Al nivel del mar, alrededor del 99 por ciento de los rayos X de baja energía (1 keV) se absorben en apenas un centímetro de aire; para rayos X de 5 keV, hacen falta 80 centímetros de aire; y son necesarios 80 metros de aire para absorber la misma proporción de rayos X de alta energía (25 keV).

El nacimiento de la astronomía de rayos X

Ahora entenderás por qué, en 1959, cuando Bruno Rossi tuvo la idea de buscar rayos X en el espacio exterior, propuso utilizar un cohete que pudiese salir por completo de la atmósfera terrestre. Pero su idea de buscar rayos X era descabellada. No existían razones teóricas sólidas para pensar que existirían rayos X provenientes de fuera del sistema solar. Pero Rossi era Rossi, y convenció a un antiguo alumno suyo, Martin Annis, que trabajaba en la empresa American Science & Engineering (AS&E), y a un miembro de su grupo, Riccardo Giacconi, de que merecía la pena explorar su idea.

Giacconi y su colega Frank Paolini desarrollaron unos tubos Geiger-Müller especiales que podían detectar rayos X y cabían en la ojiva de un cohete. De hecho, metieron tres en un cohete. Los llamaron detectores de área extensa, pero extensa entonces quería decir del tamaño de una tarjeta de crédito. El equipo de AS&E buscó financiación para este experimento, pero la NASA rechazó su propuesta.

Giacconi modificó entonces la propuesta, incluyó la Luna como objetivo, y volvió a presentarla a los Laboratorios de Investigación de las Fuerzas Aéreas en Cambridge (AFCRL: Air Force Cambridge Research Laboratories). Su argumento era que los rayos X solares debían producir la denominada emisión fluorescente en la superficie lunar y que esto facilitaría el análisis químico de la superficie. También esperaban que hubiese bremsstrahlung en la superficie lunar debido al impacto de los electrones que contiene el viento solar. Como la Luna está tan cerca, cabía la posibilidad de detectar los rayos X. Fue una decisión muy inteligente, porque AS&E ya había recibido apoyo de las Fuerzas Aéreas para varios proyectos (algunos de ellos secretos) y puede que supiesen que a la agencia le interesaba la Luna. Fuese como fuese, esta vez la propuesta se aprobó.

Tras dos intentos fallidos con cohetes en 1960 y 1961, el lanzamiento realizado un minuto antes de la medianoche del 18 de junio de 1962 tenía como misión la de tratar de detectar rayos X de la Luna y buscar fuentes de rayos X más allá del sistema solar. El cohete permaneció poco más de seis minutos por encima de los 80 kilómetros de altitud, donde los tubos Geiger-Müller pudieron detectar rayos X en el rango entre 1,5 y 6 keV sin la interferencia de la atmósfera. Así se hacían las observaciones en el espacio en aquellos tiempos. Lanzabas los cohetes fuera de la

atmósfera, donde exploraban los cielos durante solo cinco o seis minutos y volvían a bajar.

Lo realmente asombroso es que encontraron rayos X enseguida; pero no provenientes de la Luna, sino de algún otro lugar del sistema solar.

¿Rayos X del espacio profundo? ¿Por qué? Nadie entendió el descubrimiento. Antes de ese vuelo, conocíamos únicamente una estrella que emitía rayos X, nuestro propio Sol. Y si el Sol hubiese estado, por ejemplo, a diez años luz de distancia, que es como decir aquí al lado a escala astronómica, el equipo que transportaba ese histórico vuelo habría sido un millón de veces menos sensible de lo necesario para detectar sus rayos X. Todo el mundo lo sabía, así que, dondequiera que estuviese situada la fuente, tenía que emitir al menos un millón de veces más rayos X que el Sol (y eso solo en caso de que estuviera realmente cerca). No se conocían objetos astronómicos que produjesen (como mínimo) un millón de veces más rayos X que el Sol y no se había desarrollado aún la física para describirlos. Dicho de otro modo, tenía que ser un tipo de fenómeno celeste completamente nuevo.

La noche del 18 al 19 de junio de 1962 nació un nuevo campo de la ciencia: la astronomía de rayos X.

Los astrofísicos empezaron a lanzar cohetes equipados con detectores para averiguar con precisión dónde estaba situada la fuente y si había más. Siempre existe cierta imprecisión al medir la posición de objetos celestes, por lo que los astrónomos hablan de una «caja de error», una caja imaginaria pegada a la bóveda celeste cuyas caras se miden en grados y minutos y segundos de arco. La caja tiene un tamaño tal que hay un 90 por ciento de probabilidad de que el objeto se encuentre efectivamente en su interior. Los astrónomos están obsesionados con las cajas de error, por motivos evidentes: cuanto más pequeña es la caja, más precisa es la posición del objeto. Esto es especialmente importante en astronomía de rayos X, donde, cuanto más pequeña sea la caja, mayor será la probabilidad de que se pueda encontrar la homóloga óptica de la fuente. Así que conseguir que la caja sea muy pequeña es un logro de gran importancia.

El profesor Andy Lawrence, de la Universidad de Edimburgo, escribe un blog de astronomía llamado The e-Astronomer, en el que una vez recordó cómo, cuando preparaba su tesis, tuvo que revisar cientos de mapas con la posición de fuentes de

rayos X. «Una noche soñé que era una caja de error y no encontraba la fuente de rayos X que se suponía que yo contenía. Me desperté sudando.» ¡Seguro que entiendes por qué!

El tamaño de la caja de error de la fuente de rayos X que descubrieron Riccardo Giacconi, Herb Gursky, Frank Paolini y Bruno Rossi era de unos 10 × 10 grados, o 100 grados cuadrados. Para que te hagas una idea, el diámetro del Sol es de medio grado. La imprecisión al tratar de averiguar dónde estaba la fuente daba lugar a una caja cuya área equivalía a 500 soles. La caja de error incluía partes de las constelaciones de Escorpio y Norma, y rozaba un extremo de la constelación de Ara. Así que, evidentemente, no eran capaces de determinar en qué constelación estaba situada la fuente.

En abril de 1963, el grupo de Herbert Friedman en el Laboratorio de Investigación Naval de Washington, D. C., hizo avances importantes en la determinación de la posición de la fuente, al establecer que estaba situada en la constelación de Escorpio, por lo que la fuente se conoce como Sco X-1. La X viene de «rayos X» y el 1 indica que fue la primera fuente que se descubrió en la constelación de Escorpio. Tiene cierto interés histórico, aunque nunca se menciona, que la posición de Sco X-1 está unos 25 grados de distancia del centro de la caja de error que figuraba en el artículo de Giacconi et al. que marcó el nacimiento de la astronomía de rayos X. Cuando los astrónomos descubrieron nuevas fuentes en la constelación de Cygnus («el cisne»), les dieron los nombres de Cygnus X-1 (o Cyg X-1, para abreviar), Cyg X-2, etcétera; la primera fuente que se descubrió en la constelación de Hércules fue Her X-1; en Centauro, Cen X-1. En los tres años siguientes, se descubrieron utilizando cohetes una docena de fuentes nuevas, pero, salvo una excepción importante (Tau X-1, situada en la constelación de Tauro), nadie tenía ni idea de lo que eran o de cómo producían rayos X en cantidades tan enormes que podíamos detectarlos a miles de años luz de distancia.

La excepción es uno de los objetos más inusuales del firmamento: la nebulosa del Cangrejo. Si no sabes nada de ella, merece la pena que mires ahora la fotografía que hay en el cuadernillo, sospecho que la reconocerás enseguida. También hay muchas fotos en la red. Es un objeto verdaderamente extraordinario, situado a unos 6.000 millones de años luz de distancia —los asombrosos restos de la explosión de

una supernova en el año 1054, de la que dejaron constancia los astrónomos chinos (y, muy posiblemente, los pictogramas de los indígenas americanos[47]) como una estrella superbrillante que apareció de pronto en el firmamento, prácticamente de la nada, en la constelación de Tauro. (Hay cierto desacuerdo sobre la fecha exacta, aunque muchos afirman que fue el 4 de julio.) Ese mes fue el objeto más brillante en el firmamento, aparte de la Luna; durante varias semanas se pudo ver incluso de día, y durante dos años se siguió viendo por la noche.

Sin embargo, una vez que se desvaneció, los científicos parecieron olvidarse de ella hasta el siglo XVIII, cuando dos astrónomos, John Bevis y Charles Messier, la encontraron cada uno por su cuenta. Para entonces, el resto de supernova se había convertido en un objeto nebular. Messier desarrolló un importante catálogo astronómico de objetos como cometas, nebulosas y cúmulos estelares; la nebulosa del Cangrejo fue el primer objeto del catálogo, M-1. En 1939, Nicholas Mayall del Observatorio Lick (en el norte de California) dedujo que M-1 era el resto de la supernova de 1054. Hoy en día, mil años después de la explosión, aún están sucediendo tantas cosas maravillosas dentro de la nebulosa del Cangrejo que algunos astrónomos dedican sus carreras enteras a estudiarla.

El grupo de Herb Friedman se dio cuenta de que el 7 de julio de 1964 la Luna pasaría justo delante de la nebulosa e impediría que se viese. El término que los astrónomos utilizan para esta situación es «ocultación», es decir, la Luna iba a ocultar la nebulosa. Friedman no solo quería confirmar que la nebulosa era en efecto la fuente de los rayos X, sino que esperaba también poder demostrar otra cosa aún más importante.

En 1964, entre los astrónomos se había reavivado el interés por un tipo de objeto estelar cuya existencia se había postulado por primera vez durante los años treinta pero que nunca se había detectado: las estrellas de neutrones. Se especulaba que estos extraños objetos, que comentaré con más detalle en el capítulo 12, eran uno de los últimos estadios en la vida de una estrella, nacidos posiblemente durante la explosión de una supernova y compuestos mayoritariamente por neutrones. Si existían, debían de ser de una densidad tan grande que una estrella de neutrones con la masa de nuestro Sol tendría un radio de solo 10 kilómetros (20 kilómetros de

[47] Échale un vistazo a esto en http://seds.org/messier/ more/m001_sn.html#collins1999

un lado a otro, si consigues imaginártela). En 1934 (dos años después del descubrimiento de los neutrones), Walter Baade y Fritz Zwicky habían acuñado el término «supernova» y propusieron que las estrellas de neutrones se formaban en explosiones de supernova. Friedman pensaba que la fuente de rayos X de la nebulosa del Cangrejo podía ser una de estas estrellas de neutrones. Si tenía razón, la emisión de rayos X que estaba viendo desaparecería abruptamente cuando la Luna pasase por delante de ella.

Decidió lanzar varios cohetes, uno tras otro, justo cuando la Luna pasaba por delante de la nebulosa. Como conocían la posición exacta de la Luna a medida que se movía por el cielo, y podían dirigir los contadores hacia ella, podían «observar» la disminución de los rayos X cuando desapareciese la nebulosa. Resultó que, en efecto, los detectores revelaron esa disminución y esta observación fue la primera identificación óptica concluyente de una fuente de rayos X. Fue un resultado muy importante, ya que, una vez que se había producido la identificación óptica, esperábamos descubrir poco después el mecanismo en que se basaban estas enigmáticas y potentes fuentes de rayos X.

Sin embargo, Friedman se llevó una decepción. En lugar de ver un «parpadeo» cuando la Luna pasó delante de la nebulosa, los rayos X desaparecieron gradualmente, lo que indicaba que provenían de la nebulosa en su conjunto y no de un pequeño objeto individual. Así que no había encontrado una estrella de neutrones. No obstante, hay una estrella de neutrones muy especial en la nebulosa del Cangrejo y emite rayos X; ¡la estrella rota sobre su eje unas treinta veces por segundo! Si quieres darte el capricho, entra en el sitio web del Observatorio de rayos X Chandra[48] y busca imágenes de la nebulosa del Cangrejo. Te aseguro que son asombrosas. Pero hace cuarenta y cinco años no disponíamos de telescopios orbitales de rayos X, por lo que teníamos que ser mucho más ingeniosos. (Tras el descubrimiento de los púlsares por Jocelyn Bell en 1967, en 1968 el grupo de Friedman finalmente detectó los pulsos de rayos X —unos treinta por segundo— de la estrella de neutrones en la nebulosa del Cangrejo.)

Justo cuando Friedman observaba la ocultación de la nebulosa, mi (futuro) amigo en el MIT George Clark estaba en Texas preparándose para un vuelo nocturno en globo

[48] http://chandra.harvard.edu/

a gran altitud para buscar los rayos X de alta energía de Sco X-1. Pero cuando supo de los resultados de Friedman —incluso sin internet, las noticias viajaban rápido— cambió sus planes por completo y pasó a efectuar un vuelo diurno en busca de rayos X de más de 15 keV de la nebulosa del Cangrejo. ¡Y también los encontró!

Es difícil expresar en palabras lo emocionante que fue todo esto. Asistíamos al amanecer de una nueva era para la exploración científica. Sentíamos que levantábamos un telón que había estado ocultando estos asombrosos dominios del universo. En realidad, al llevar nuestros detectores a esa altura, al llegar al espacio, al aproximarnos al extremo superior de la atmósfera, donde los rayos X llegaban sin ser absorbidos por el aire, nos estábamos quitando las anteojeras que habíamos tenido puestas durante toda la historia de la humanidad. Estábamos trabajando en un dominio espectral completamente nuevo.

Esto ha sucedido con frecuencia en la historia de la astronomía. Cada vez que hemos sabido que los objetos celestes emiten nuevos o diferentes tipos de radiación, hemos tenido que modificar lo que creíamos que sabíamos de las estrellas, de sus ciclos de vida (cómo nacen, cómo viven y cómo y por qué mueren), sobre la formación y evolución de los cúmulos estelares, sobre las galaxias e incluso sobre los cúmulos de galaxias. La radioastronomía, por ejemplo, nos ha enseñado que los centros de las galaxias pueden emitir chorros de cientos de miles de años luz de longitud; también nos ha descubierto los púlsares, los cuásares y las radiogalaxias y es responsable del descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas, que ha cambiado por completo nuestra forma de ver el universo. La astronomía de rayos gamma ha descubierto algunas de las más potentes y (afortunadamente) distantes explosiones del universo, conocidas como brotes de rayos gamma, que emiten una luminiscencia residual en forma de rayos X y en todo el espectro de la luz visible hasta las ondas de radio.

Sabíamos que el descubrimiento de rayos X en el espacio iba a cambiar nuestra forma de entender el universo, pero no sabíamos cómo. Mirásemos donde mirásemos con nuestros nuevos equipos, veíamos cosas nuevas. Quizá no resulte sorprendente. Cuando los astrónomos ópticos empezaron a obtener imágenes del telescopio espacial Hubble estaban fascinados, sobrecogidos y —quizá esto no sea tan obvio— con ganas de más. Pero, en definitiva, estaban ampliando el alcance de

un instrumento que existía desde hacía siglos, en un campo que tenía miles de años. Como astrónomos de rayos X, nosotros estábamos viviendo los inicios de un campo científico completamente nuevo. ¿Quién podía saber adónde nos conduciría o qué descubriríamos? ¡Nosotros desde luego no!

Cuánta suerte tuve que Bruno Rossi me invitase al MIT en enero de 1966, justo cuando este campo despegaba, y de unirme enseguida al grupo de George Clark. George era un físico muy inteligente, una persona realmente impresionante de quien me hice amigo para toda mi vida. Incluso ahora me cuesta creer la suerte que tuve: un gran amigo y una nueva carrera, todo en el mismo mes.

Capítulo 11

Los primeros días de los globos de rayos X

Cuando llegué al MIT, había cinco grupos de globos estratosféricos activos en el mundo: el de George Clark en el MIT, el de Ken McCracken en la Universidad de Adelaida en Australia, el de Jim Overbeck en el MIT, el de Larry Peterson en la Universidad de California en San Diego y el de Bob Haymes en la Universidad Rice. Este capítulo está dedicado principalmente a mis propias experiencias con los globos de rayos X, sobre los que se centraron mis investigaciones entre 1966 y 1976. A lo largo de esos años hice observaciones desde Palestine, en Texas; Page, en Arizona; Calgary, en Canadá, y Australia.

Los globos transportaban nuestros detectores de rayos X hasta una altura de unos 45 kilómetros, donde la presión atmosférica es solo el 0,3 por ciento de la presión a nivel del mar. Cuando la atmósfera es tan rala, buena parte de los rayos X con energías superiores a los 15 keV la atraviesan.

Nuestras observaciones con globos eran complementarias de las realizadas con cohetes. Los detectores montados en cohetes normalmente observaban rayos X en el rango entre 1 y 10 keV y solo durante unos cinco minutos en cada vuelo. Las observaciones con globos podían durar horas (mi vuelo más largo fue de veintiséis horas) y mis detectores observaban rayos X por encima de los 15 keV.

No todas las fuentes que se detectaban desde los cohetes se observaban desde los globos, ya que las fuentes a menudo emitían la mayoría de su energía como rayos X de baja energía. Por otra parte, podíamos detectar fuentes que emitían principalmente rayos X de alta energía y que resultaban invisibles en las observaciones con cohetes. Por tanto, no solo descubrimos nuevas fuentes y ampliamos el espectro de fuentes conocidas hacia las altas energías, sino que también fuimos capaces de detectar la variabilidad en la luminosidad de los rayos X de las fuentes en escalas temporales de entre minutos y horas, algo que no era posible hacer con los cohetes. Este fue uno de los primeros éxitos en mi investigación en astrofísica.

En 1967 descubrimos, para nuestra sorpresa, una llamarada de rayos X proveniente de Sco X-1 (más adelante en el capítulo os contaré todo al respecto). Mi grupo

también descubrió tres fuentes de rayos X (GX 301-2, GX 304-1 y GX 1+4) que nunca se habían visto durante las observaciones con cohetes, y todas ellas mostraban variaciones en la intensidad de los rayos X en escalas temporales de minutos. GX 1+4 incluso presentaba una variabilidad cíclica, con un período de 2,3 minutos. En ese momento, no teníamos ni idea de cuál podía ser la causa de unos cambios tan rápidos en la intensidad de los rayos X, y menos aún de la periodicidad de 2,3 minutos, pero sabíamos que estábamos abriendo nuevos caminos, descubriendo territorios desconocidos.

No obstante, algunos astrónomos, incluso a finales de la década de 1960, aún no habían asimilado la importancia de la astronomía de rayos X. En 1968 conocí en casa de Bruno Rossi al astrónomo holandés Jan Oort. Oort era uno de los astrónomos más famosos y había sido un increíble visionario: justo después de la Segunda Guerra Mundial, dio un curso entero sobre radioastronomía en los Países Bajos. Cuando vino al MIT ese año, le mostré los datos de los vuelos con globos en 1966 y 1967, y me dijo —siempre lo recordaré—: «La astronomía de rayos X no es muy importante». ¿Te lo puedes creer? «No es muy importante.» No podía estar más equivocado. Era uno de los astrónomos más grandes de todos los tiempos y era completamente incapaz de ver su importancia. Quizá porque yo era más joven y estaba más hambriento —para ser justo, debo decir que él tenía entonces sesenta y ocho años—, para mí era evidente que estábamos encontrando oro puro y que apenas empezábamos a arañar la superficie.

Recuerdo que en los años sesenta y setenta leía todos y cada uno de los trabajos que se publicaban sobre astronomía de rayos X. En 1974 di cinco clases en Leiden (con Oort entre el público) y pude tratar toda la astronomía de rayos X. Hoy en día, cada año se publican miles de trabajos sobre este campo, con multitud de subcampos, y nadie lo puede abarcar. Muchos investigadores dedican sus carreras enteras a un único tema específico de entre decenas de ellos, como las estrellas solitarias, los discos de acreción, las binarias de rayos X, los cúmulos globulares, las enanas blancas, las estrellas de neutrones, los agujeros negros, los restos de supernovas, las erupciones y los chorros de rayos X, los núcleos galácticos o los cúmulos de galaxias. Los primeros años fueron los mejores para mí, pero también los más exigentes, en prácticamente todos los sentidos: intelectual, física e incluso

logísticamente. El lanzamiento de globos era tan complicado y caro, requería tanto tiempo y provocaba tanta tensión que me cuesta mucho describirlo. Aun así, lo intentaré.

Levantando el vuelo: globos, detectores de rayos X y su lanzamiento

Antes de que un físico pueda hacer cualquier cosa (a menos, claro está, que sea un físico teórico, en cuyo caso solo necesitará una hoja de papel o una pantalla de ordenador), tiene que conseguir financiación para construir el equipo y pagar a los becarios, y a veces también para largas estancias lejos de casa. Gran parte de lo que los físicos hacen en realidad es redactar solicitudes de becas, en programas muy competitivos, para obtener financiación para sus investigaciones. Sé que no es sugerente ni romántico, pero créeme, nada sucede sin esta parte del trabajo. Nada.

Puedes tener una idea maravillosa para un experimento o una observación, pero si no sabes cómo convertirla en una propuesta ganadora no llegará a ningún sitio. Siempre competíamos con los mejores del mundo, por lo que la lucha era feroz. Lo sigue siendo, prácticamente para cualquier científico en el campo que sea. Cuando ves a un científico experimental de éxito —en biología, química, física, informática, economía o astronomía, da igual—, estás viendo también a alguien que ha sabido imponerse a sus competidores una y otra vez. En general, eso hace que no sean personas afables y poco espabiladas. Por eso a mi mujer Susan, que ha trabajado diez años allí, le gusta decir: «No hay ego pequeño en el MIT».

Supongamos que conseguíamos la financiación, algo que solía suceder (yo recibí un generoso apoyo por parte de la National Science Foundation y de la NASA). Lanzar un globo a casi 50 kilómetros de altura, con un telescopio de rayos X de casi 1.000 kilos (enganchado a un paracaídas) que tenías que recuperar intacto, era un proceso muy complejo. Debías tener la certeza de que el tiempo sería estable durante el lanzamiento, porque los globos eran tan delicados que una ráfaga de viento podía dar al traste con toda la misión. Necesitabas cierta infraestructura —sitios y vehículos de lanzamiento, y elementos por el estilo— para conseguir que los globos ascendiesen en la atmósfera y para poder seguir su recorrido. Como yo quería hacer observaciones en la dirección aproximada del centro de la Vía Láctea, lo que se llama el centro galáctico, donde están situadas muchas de las fuentes de

rayos X, necesitaba hacerlas desde el hemisferio sur. Elegí hacer el lanzamiento desde Mildura y Alice Springs, en Australia. Estaba muy lejos de mi casa y de mi familia —por aquel entonces tenía cuatro niños—, normalmente durante períodos de dos meses cada vez.

Todo lo que rodeaba los lanzamientos era caro. Los propios globos eran enormes. El más grande de los que lancé (que en ese momento fue el globo más grande que se había lanzado nunca, y puede que lo siga siendo) tenía un volumen de casi un millón y medio de metros cúbicos; completamente inflado y volando a cerca de 45.000 metros de altura, su diámetro era de unos 72 metros. Los globos estaban hechos de un polietileno muy ligero (de una milésima de centímetro de grosor, más fino que el plástico para envolver alimentos o el papel de fumar). Si llegaban a tocar el suelo durante el lanzamiento podían rasgarse. Estos hermosos globos gigantes pesaban unos 320 kilogramos. Normalmente llevábamos uno de repuesto y cada uno costaba 100.000 dólares (hace cuarenta años eso era mucho dinero).

Se fabricaban en fábricas gigantescas. Las nesgas, las secciones del globo que parecen gajos de piel de mandarina, se fabricaban por separado y se unían sellándolas con calor. El fabricante solo confiaba en mujeres para hacer el sellado; decía que era notorio que los hombres eran demasiado impacientes y cometían demasiados errores. Después teníamos que enviar hasta Australia el helio para llenar los globos. Solo el helio costaba unos 80.000 dólares por globo. En cifras actuales, un globo con su helio costaba más de 700.000 dólares, sin contar el de repuesto ni nuestro transporte, alojamiento y comida. Eso es, ahí estábamos, tratando de desentrañar los secretos del espacio exterior, viviendo en mitad del desierto australiano, a merced del tiempo. Y aún no te he hablado de Jack. Lo haré enseguida.

Pero los globos eran baratos en comparación con los telescopios. Cada telescopio, una máquina extremadamente compleja que pesaba alrededor de una tonelada, se tardaba alrededor de dos años en construir y costaba un millón de dólares (cuatro millones en dólares actuales). Nunca tuvimos dinero suficiente para tener dos telescopios a la vez. Así que, si perdíamos nuestro telescopio —lo que nos pasó dos veces—, eso suponía dos años perdidos. Ni siquiera podíamos empezar a fabricar uno nuevo hasta que conseguíamos financiación, así que perderlo era una

catástrofe.

Y no solo para mí, ni mucho menos. Suponía un retraso muy importante para mis alumnos de doctorado, que estaban muy implicados en la fabricación de telescopios y cuyas tesis doctorales versaban sobre los instrumentos y los resultados de las observaciones. Sus doctorados se esfumaban en el aire junto con los globos.

También necesitábamos la cooperación del tiempo. En la estratosfera hay vientos intensos, que soplan de este a oeste a más de 150 kilómetros por hora durante seis meses al año, y de oeste a este la otra mitad del año. Cambian de dirección dos veces al año —lo llamamos viraje en redondo— y, al hacerlo, la velocidad del viento a 45.000 metros baja mucho, lo que permite hacer observaciones durante muchas horas. Así que necesitábamos estar en un sitio donde pudiésemos medir estos vientos y realizar el lanzamiento durante el viraje en redondo. Cada dos días explorábamos la situación con globos sonda que seguíamos por radar. La mayor parte de las veces llegaban a casi 40 kilómetros de altura, antes de estallar. Pero predecir la atmósfera no es como empujar unos rodamientos por unos raíles en una demostración de laboratorio. La atmósfera es muchísimo más compleja y, por tanto, mucho menos predecible, a pesar de lo cual todo dependía de que hiciésemos buenas predicciones.

Aún había más. A una altitud de entre unos 9.000 y 18.000 metros está la tropopausa, donde la temperatura es muy baja —50 grados Celsius bajo cero— y nuestros globos se volvían muy quebradizos. También estaban los vientos de las corrientes en chorro, que golpeaban el globo y podían hacerlo estallar. Muchas cosas podían ir mal. Una vez, mi globo voló hacia el mar y adiós al telescopio. La carga apareció nueve meses más tarde en una playa de Nueva Zelanda. Milagrosamente, con la ayuda de Kodak, conseguimos recuperar los datos que se habían grabado en película en el propio globo.

Nos preparábamos una y otra vez para estos lanzamientos, y aun así yo siempre dije que, aunque nos preparáramos como locos, seguíamos necesitando un poco de suerte. A veces, mucha suerte. Llevábamos el equipo a una estación remota. Hacíamos pruebas con el telescopio, calibrando los instrumentos y comprobando que todo funcionaba. Revisábamos el aparejo que unía el telescopio con el paracaídas, que también enlazaría con el globo. Podíamos tardar tres semanas en

hacer todas las pruebas en el lugar de lanzamiento del globo y en estar preparados para el vuelo, y después podía suceder que el tiempo no ayudase. Y entonces no teníamos otra cosa que hacer que sentarnos y esperar, manteniendo las baterías cargadas. Es una suerte que Alice Springs fuese tan bonito: un fantástico pueblo en el desierto, en pleno corazón de Australia. Realmente parecía que estábamos en mitad de ninguna parte, pero los cielos estaban despejados y las madrugadas en que intentábamos el lanzamiento eran espectaculares: el cielo nocturno adquiría el tono azul del amanecer y el Sol al salir teñía el cielo y el desierto de brillantes tonos rosas y naranjas.

Cuando ya estábamos preparados, necesitábamos que los vientos fuesen de menos de 5 kilómetros por hora y con dirección constante durante tres o cuatro horas, que era el tiempo que tardaba el globo en despegar (se tardaba dos horas solo en hincharlo). Por eso solíamos hacer los lanzamientos al amanecer, cuando menos viento había. Pero podía suceder que nuestra previsión fuese errónea y tuviésemos que esperar, esperar y esperar un poco más hasta que el tiempo lo permitiese.

Una vez, en mitad de un lanzamiento en Mildura —ni siquiera habíamos empezado a inflar el globo— se levantó viento, en contra de las previsiones meteorológicas. El globo acabó destrozado, pero gracias a Dios el telescopio se salvó. Toda la preparación, y 200.000 dólares, se esfumaron en unos pocos segundos. Dime si eso no duele. Todo lo que pudimos hacer fue esperar a que mejorase el tiempo y volver a intentarlo con el globo de repuesto.

Los fracasos no se olvidan. En mi última expedición a Alice Springs, perdimos dos globos seguidos durante el lanzamiento, porque el personal cometió varios desafortunados errores. Nuestra expedición fue un completo fracaso, pero al menos el telescopio no resultó dañado; nunca llegó a despegar. En mi última expedición (en 1980), en Palestine, Texas, el vuelo de ocho horas fue un éxito, pero cuando lo dimos por finalizado, por control remoto, perdimos el telescopio, porque el paracaídas no se abrió.

Incluso hoy en día, los lanzamientos de globos no son en absoluto infalibles. En un intento de lanzamiento por parte de la NASA desde Alice Springs en la primavera de 2010, algo fue mal y el globo se estrelló contra el suelo al intentar despegar, destrozando millones de dólares en equipo, y estuvo a punto de herir a los

espectadores[49].

A lo largo de los años he lanzado unos veinte globos. Solo cinco fallaron durante el lanzamiento o no alcanzaron la altitud prevista (puede que perdiesen helio). Esto se consideraba un buen porcentaje de éxito (75 por ciento). En el cuadernillo puedes ver una fotografía de la inflación de un globo (con helio) y otra de un lanzamiento.

Meses antes de viajar al lugar de lanzamiento, probábamos la carga con una empresa de Wilmington, Massachusetts. Metíamos el telescopio en una cámara de vacío y reducíamos la presión del aire hasta la que se encontraría en altitud, unas tres milésimas de atmósfera. A continuación lo enfriábamos hasta 50 grados Celsius bajo cero y lo poníamos en funcionamiento, encendiendo todos los detectores de rayos X y observando durante veinticuatro horas seguidas, a intervalos de diez segundos cada veinte minutos, los rayos X que emitía una fuente radiactiva. Los telescopios de algunos de nuestros competidores —sí, sentíamos que los otros grupos que estaban haciendo el mismo tipo de trabajo eran nuestra competencia— fallaban a veces porque sus baterías perdían potencia o dejaban de funcionar a bajas temperaturas. Eso nunca nos pasó a nosotros, porque las probábamos a conciencia. Si durante el período de pruebas veíamos que nuestras baterías iban a perder potencia, buscábamos la manera de calentarlas, si hacía falta, para que siguiesen funcionando.

También estaba, por ejemplo, el problema de las descargas de corona, las chispas que saltan desde los cables de alta tensión. Parte de nuestro equipo funcionaba con alta tensión y en aire muy ralo, donde la presión es muy baja, un ambiente ideal para que salten chispas, desde los cables al aire. ¿Recuerdas el zumbido que se oye cerca de las líneas de transmisión que he mencionado en el capítulo 7? Eso es una descarga de corona. Cualquier físico experimental que trabaje con altos voltajes sabe que se puede producir una descarga de corona. En mis clases, donde una descarga de corona es divertida, muestro ejemplos de estas chispas. Pero a 45.000 metros es una catástrofe.

Simplificando, el equipo empezaba a chisporrotear y el ruido electrónico era tal que no se podían distinguir los fotones de los rayos X. ¿Tan desastroso era? Total y completamente: no se obtenía ningún dato útil en un vuelo. La solución pasaba por

[49] Puedes ver lo sucedido en www.physorg.com/news191742850.html.

revestir todos los cables de alta tensión con silicona. Otros lo habían hecho y seguían teniendo descargas de corona. Las pruebas y la preparación merecieron la pena: nunca se produjeron descargas de corona. Este es solo uno de entre las decenas de difíciles problemas de ingeniería que se presentan al fabricar estos complejos telescopios; por eso se tardaba tanto en hacerlo y costaban tanto dinero.

Una vez que habíamos puesto el telescopio en mitad de la atmósfera, ¿cómo detectábamos los rayos X? La respuesta no es sencilla, así que te pido un poco de paciencia. Para empezar, no utilizábamos los contadores proporcionales (rellenos de gas) que usaban los cohetes, sino un tipo especial de detector (cristales de yoduro de sodio) capaz de detectar rayos X con energías de más de 15 keV. Cuando un fotón de rayos X penetra en uno de estos cristales, puede sacar a un electrón de su órbita y transferirle su energía (es la llamada absorción fotoeléctrica). Este electrón a su vez dejará un rastro de iones en el cristal antes de detenerse. Cuando estos iones se neutralizan, liberan energía en su mayor parte en forma de luz visible, con lo que la energía del fotón de rayos X se convierte en un destello de luz. Cuanto mayor sea la energía de los rayos X, más intensos serán los destellos. Utilizábamos fotomultiplicadores para detectarlos y convertirlos en pulsos eléctricos: cuanto más brillante era el destello, mayor el voltaje del pulso.

Después amplificábamos los pulsos y los enviábamos a un discriminador, que medía su voltaje y los clasificaba en función de su magnitud (que indicaba los niveles de energía de los rayos X). En los primeros tiempos, solo registrábamos rayos X en cinco niveles de energía diferentes.

Para tener constancia de las detecciones tras el vuelo, en la primera época los grabábamos en el propio globo, por nivel de energía y por el momento en que se detectaban. Conectábamos el discriminador para que enviase los impulsos clasificados a diodos emisores de luz, que formaban un patrón de luces parpadeantes en esos cinco niveles de energía distintos y fotografiábamos esas luces con una cámara de película continua.

Si una luz se encendía, dejaba huella en la película. Vista en su conjunto, la película de una observación parecía una serie de puntos y líneas, líneas y puntos. De vuelta en el MIT, «leíamos» la película con un lector especial diseñado por George Clark que pasaba las líneas y puntos a cinta perforada (cinta de papel con agujeros).

Después leíamos la cinta con diodos sensibles a la luz y grabábamos los datos en cinta magnética. Habíamos escrito un programa en Fortran en tarjetas perforadas (sé que esto suena prehistórico) y lo usábamos para leer la cinta magnética y pasar la información a la memoria del ordenador, que —¡por fin!— nos proporcionaba un recuento de los rayos X en función del tiempo en los cinco canales de energía diferentes.

Sé que parece una máquina de Rube Goldberg[50], pero piensa en lo que estábamos intentando hacer: tratábamos de medir la tasa de recuento (el número de rayos X por segundo) y los niveles de energía de fotones de rayos X, así como la ubicación de la fuente que los había emitido; fotones que habían viajado durante miles de años a la velocidad de la luz, esparciéndose por la galaxia, cada vez más separados, proporcionalmente al cuadrado de la distancia que habían recorrido. Y, a diferencia de la estabilidad de un telescopio situado sobre un monte, cuyo sistema de control puede mantenerlo enfocado sobre el mismo punto durante muchas horas y que puede volver a él noche tras noche, teníamos que aprovechar el tiempo de que disponíamos (como mucho, una vez al año) —siempre del orden de horas— mientras un frágil globo transportaba nuestro telescopio de 1.000 kilos a 45.000 metros de la Tierra.

Cuando el globo estaba en el aire, yo lo seguía en una avioneta, normalmente teniéndolo a la vista (durante el día, claro; no por la noche), volando a solo entre 1.500 y 3.000 metros. Puedes imaginarte la experiencia, durante muchas horas seguidas cada vez. Yo no soy bajito. Era fácil, muy fácil, marearse en esas avionetas de cuatro asientos, volando durante ocho, diez, doce horas. Además, estaba nervioso todo el tiempo que el globo permanecía en el aire. Solo te podías relajar una vez que lo habías recuperado, cuando ya tenías en las manos todos los datos.

El globo era tan enorme que incluso cuando estaba a casi 50 kilómetros de altura si le daba la luz del Sol podías verlo claramente. Con el radar podíamos seguirlo a gran distancia del lugar de lanzamiento, hasta que la curvatura de la Tierra lo hacía imposible. Por eso equipamos el globo con un radiotransmisor y por la noche

---

[50] Una máquina de Rube Goldberg es un aparato excesivamente caro que realiza una tarea muy simple de una manera muy enrevesada. *(N. del T.)*

teníamos que pasar a seguirlo solo mediante radiofaro. Daba igual cuánto nos esforzásemos por informar del lanzamiento publicando artículos en los periódicos locales, los globos podían desplazarse a la deriva cientos de kilómetros y cuando estaban en el aire recibíamos todo tipo de informaciones sobre ovnis. Era gracioso, pero en realidad tenía sentido. ¿Qué otra cosa podía pensar la gente cuando avistaba en el cielo un ente misterioso de tamaño y a distancia indeterminados? Para ellos se trataba realmente de un objeto volador no identificado. En el cuadernillo puedes ver una fotografía tomada con el telescopio de un globo a 45.000 metros.

A pesar de toda nuestra planificación y de las previsiones meteorológicas, e incluso durante el viraje en redondo, los vientos a 45.000 metros de altura podían ser muy variables. En una ocasión, en Australia, esperábamos que el globo se dirigiese hacia el norte desde Alice Springs, pero se fue directo hacia el sur. Lo seguimos visualmente hasta la puesta de sol y mantuvimos contacto por radio durante la noche. Por la mañana se estaba acercando demasiado a Melbourne y no teníamos permiso para entrar en el espacio aéreo entre Sidney y Melbourne. Nadie iba a derribarlo, pero teníamos que hacer algo. Cuando nuestro globo díscolo estaba a punto de entrar en espacio aéreo prohibido, a regañadientes dimos por control remoto la orden de que soltase la carga. Separar el telescopio del globo haría que este se rasgase —no podría soportar la onda de choque provocada por la liberación súbita de la carga— y el telescopio empezaría a caer, el paracaídas se abriría (salvo en 1980) y bajaría lentamente, llevando el telescopio de vuelta a la Tierra sano y salvo. También caerían al suelo enormes trozos del globo, normalmente desperdigados en una superficie de al menos un acre. Esto sucedía, tarde o temprano, en todos los vuelos y siempre era un momento triste (aunque necesario), porque estábamos dando la misión por terminada, cortando el flujo de datos. Queríamos que el telescopio permaneciese en el aire el mayor tiempo posible, tan hambrientos estábamos de datos en esos tiempos.

Rescate en el outback: Jack el canguro

Poníamos cojinetes de cartón en la parte inferior del telescopio para amortiguar el aterrizaje. Si se producía de día y teníamos contacto visual con el globo (que

desaparecía de pronto cuando le dábamos la orden de soltar la carga), enseguida veíamos el paracaídas; intentábamos seguirlo en su recorrido hasta el suelo, dando vueltas a su alrededor con la avioneta. Una vez que aterrizaba, marcábamos su posición en un mapa muy detallado con la mayor precisión posible.

Comenzaba entonces la parte realmente extraña: ahí estábamos, en la avioneta, y la carga, con todos nuestros datos, la culminación de años de trabajo, estaba en el suelo, casi a nuestro alcance, ¡pero no podíamos simplemente aterrizar en mitad del desierto y cogerla! Lo que teníamos que hacer era llamar la atención de la gente del lugar, cosa que solíamos hacer volando muy bajo sobre una casa. En el desierto las casas están muy separadas unas de otras. Sus habitantes sabían lo que significaba el vuelo bajo de la avioneta, así que salían de la casa y nos hacían señas con los brazos. Entonces nos dirigíamos a la pista de aterrizaje más cercana (no lo confundas con un aeropuerto) en el desierto y esperábamos a que se presentasen allí.

En uno de los vuelos, había tan pocas casas en la zona que tuvimos que buscar durante un rato. Finalmente, encontramos a un tipo, Jack, que vivía en el desierto a 80 kilómetros de su vecino más cercano. Estaba borracho y bastante loco, cosa que nosotros al principio no sabíamos, claro. Pero establecimos contacto con él desde el aire, fuimos a la pista de aterrizaje y esperamos; unas quince horas después, apareció en su camioneta, vieja, abollada y sin parabrisas, solo un techo sobre la cabina y una plataforma abierta detrás. A Jack le encantaba ir como un loco por el desierto a 100 kilómetros por hora, persiguiendo y disparando a canguros.

Me monté en la camioneta con Jack y uno de mis estudiantes de doctorado, mientras nuestra avioneta de seguimiento nos llevaba hacia la carga. La camioneta iba campo a través y manteníamos contacto con la avioneta por radio. Tuvimos suerte con Jack: a pesar de cazar canguros, sabía realmente por dónde se podía meter.

También tenía un juego horrible que yo odiaba, pero ya dependíamos de él, así que no había mucho que hacer; solo me lo enseñó una vez. Puso a su perro en el techo de la camioneta, aceleró a 100 kilómetros por hora, pisó el freno a fondo y el perro salió catapultado por el aire hasta el suelo. ¡Pobre perro! Jack no paraba de reírse y acabó soltando: «Un perro viejo no aprende trucos nuevos».

Tardamos medio día en llegar a la carga, vigilada por una iguana de dos metros, un bicho de aspecto realmente repugnante. Para ser sincero, me dio un buen susto. Pero, por supuesto, no quería que se notase, así que le dije a mi alumno: «No pasa nada. Estos animales son inofensivos. Ve tú primero». Y lo hizo, y resultó que son inofensivos, y no se movió en las cuatro horas que tardamos en recuperar la carga y subirla a la camioneta de Jack.

El profesor del globo

Después volvimos a Alice Springs y, cómo no, salimos en la portada del Centralian Advocate con una gran fotografía del lanzamiento del globo. El titular decía COMIENZA LA INVESTIGACIÓN ESPACIAL y el artículo hablaba de la vuelta del «profesor del globo». Me había convertido en una especie de celebridad local y di charlas en el Rotary Club[51] y a alumnos del instituto e incluso una vez en un asador, lo que me valió una cena para todo el equipo. Lo que realmente queríamos hacer era volver a casa con la película lo más pronto posible, revelarla, analizarla y ver qué habíamos encontrado. Así que tras unos días recogiendo nos volvimos. Puedes hacerte una idea de lo exigente que era este tipo de investigación. Pasaba al menos unos dos meses fuera de casa cada dos años (a veces, todos los años). No me cabe duda de que mi primer matrimonio se resintió mucho por ello.

Al mismo tiempo, a pesar de todos los nervios y la tensión, era emocionante y muy divertido, y estaba orgulloso de mis estudiantes de doctorado, en particular de Jeff McClintock y George Ricker. Jeff ahora es astrofísico jefe en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics y en 2009 ganó el premio Rossi (¿adivinas a quién debe su nombre?) por su trabajo en la medición de las masas de agujeros negros en sistemas estelares binarios.

A su manera, los globos eran muy románticos. Levantarse a las cuatro de la mañana, conducir hasta el aeropuerto, contemplar el amanecer y la espectacular inflación del globo; el precioso desierto bajo el cielo, al principio solo las estrellas y después, poco a poco, ver cómo salía el Sol. Más tarde, cuando soltábamos el globo y ascendía en el cielo, sus reflejos plateados y dorados al amanecer. Y ser

[51] Rotary International es una organización humanitaria de voluntarios compuesta por más de treinta mil clubes y presente en más de ciento sesenta países. *(N. del T.)*

consciente de cuántas cosas tenían que salir bien, lo que hacía que estuvieses en tensión todo el tiempo. Dios mío. Y la increíble sensación cuando parecía que el lanzamiento había sido bueno y los miles de detalles (cada uno de ellos causa potencial de un desastre) parecían encajar uno tras otro.

Una llamarada de rayos X de Sco X-1

Ninguno de los descubrimientos que realizamos en esos años fue más emocionante para mí que el hallazgo completamente inesperado de que algunas fuentes de rayos X presentan extraordinarios estallidos en la cantidad de rayos X que emiten. La idea de que la intensidad de los rayos X provenientes de algunas fuentes era variable flotaba en el ambiente a mediados de la década de 1960. Philip Fisher y su grupo en Lockheed Missiles and Space Company compararon la intensidad de los rayos X de siete fuentes detectadas durante el vuelo de su cohete el 1 de octubre de 1964 con las obtenidas el 16 de junio de ese año por el grupo de Friedman con otro cohete. Descubrió que la intensidad de los rayos X (llamado flujo de rayos X) de la fuente Cyg XR-1 (hoy Cyg X-1) era cinco veces menor el 1 de octubre que el 16 de junio. Pero no estaba claro si esto era prueba de una variabilidad real o no. El grupo de Fisher señaló que la diferencia se podía explicar porque los detectores que utilizó el grupo de Friedman eran mucho más sensibles a los rayos X de baja energía que los que ellos habían utilizado.

El asunto quedó aclarado en 1967 cuando el grupo de Friedman comparó el flujo de rayos X de treinta fuentes durante los dos años anteriores y determinó que la intensidad de muchas de ellas variaba realmente. Resultaba particularmente llamativa la variabilidad de Cyg X-1.

En abril de 1967, el grupo de Ken McCracken en Australia lanzó un cohete y descubrió una fuente casi tan brillante como Sco X-1 (la más brillante de todas las conocidas hasta entonces), que no había aparecido cuando los detectores observaron el mismo lugar un año y medio antes. Dos días después del anuncio de esta «nova de rayos X» (como se la llamó), durante la reunión de primavera de la American Physical Society en Washington, D. C., hablé por teléfono con uno de los más eminentes pioneros en astronomía de rayos X, que me dijo: «¿Te puedes creer semejante disparate?».

Su intensidad se redujo por tres en unas pocas semanas, y cinco meses después había disminuido al menos en un factor cincuenta. Hoy en día, estas fuentes reciben el nombre informal de «fuentes transitorias de rayos X».

El grupo de McCracken había situado la fuente en la constelación de Crux, más conocida como la Cruz del Sur. Estaban muy emocionados y para ellos pasó a ser algo sentimental, ya que esa constelación aparece en la bandera australiana. Cuando resultó que la ubicación de la fuente quedaba justo fuera de la Cruz del Sur, en Centaurus, el nombre original, Crux X-1, se cambió a Cen X-2, para gran decepción de los australianos. Los científicos podemos ponernos muy sentimentales con nuestros descubrimientos.

El 15 de octubre de 1967, George Clark y yo observamos Sco X-1 durante diez horas desde un globo lanzado desde Mildura, en Australia, e hicimos un descubrimiento muy importante. Nuestra reacción no tuvo nada que ver con las fotografías del Centro Espacial de la NASA en Houston, donde todos gritan y se abrazan cuando tienen éxito. Ellos ven cómo suceden las cosas en tiempo real; nosotros no teníamos acceso a los datos durante la observación; solo esperábamos que el globo se mantuviese en el aire y que nuestro equipo funcionase sin fallos. Y, por supuesto, nos preocupaba cómo recuperar el telescopio y los datos. Ahí se concentraban todos los nervios y la emoción.

Analizamos los datos meses más tarde, ya de vuelta en el MIT. Una noche estaba en la sala de ordenadores, con Terry Thorsos como ayudante. En esa época, en el MIT teníamos unos ordenadores muy voluminosos. Las salas tenían que tener aire acondicionado, porque los ordenadores generaban mucho calor. Recuerdo que eran alrededor de las once de la noche. Si querías ejecutar un programa, la noche era un buen momento para colar algunos trabajos. En esa época siempre necesitabas que un técnico ejecutase tus programas. Me puse a la cola y esperé pacientemente.

Así que ahí estaba, mirando los datos del globo, cuando de pronto vi un gran incremento en el flujo de rayos X provenientes de Sco X-1. Allí mismo, en la copia impresa, el flujo se multiplicó por cuatro en unos diez minutos, se mantuvo así durante treinta minutos y luego disminuyó. Habíamos observado una enorme llamarada de Sco X-1, algo que no se había visto nunca antes. Normalmente te preguntabas: «¿Se puede explicar esta llamarada de alguna otra forma? ¿Puede

deberse a que algún detector no ha funcionado bien?». En este caso, yo no tenía ninguna duda. Conocía el instrumento perfectamente. Confiaba en nuestra preparación y nuestras pruebas, y a lo largo del vuelo habíamos comprobado el detector continuamente y, como control, habíamos medido el espectro de rayos X de una fuente radiactiva conocida cada veinte minutos. Los instrumentos funcionaban perfectamente y yo confiaba en los datos al cien por cien. En la copia impresa pude ver cómo el flujo de rayos X aumentaba y disminuía; de todas las fuentes que habíamos observado en ese vuelo de diez horas, solo una se disparó y volvió a bajar, Sco X-1. ¡Era real!

A la mañana siguiente, le enseñé los resultados a George Clark y casi se cae de la silla. Ambos conocíamos el campo muy bien y rebosábamos de alegría. Nadie había previsto, y menos aún observado, un cambio en el flujo de una fuente de rayos X en una escala temporal de diez minutos. El flujo de Cen X-2 se redujo por tres a lo largo de unas pocas semanas desde la primera detección, pero aquí teníamos una variabilidad de un factor cuatro en diez minutos, unas tres mil veces más rápido.

Sabíamos que Sco X-1 emitía el 99,9 por ciento de su energía en forma de rayos X y que su luminosidad de rayos X era unas 10.000 veces mayor que la luminosidad total del Sol y unas 10.000 millones de veces mayor que su luminosidad de rayos X. Sencillamente, no disponíamos de la física necesaria para entender que la luminosidad de Sco X-1 podía variar en un factor cuatro en una escala temporal de diez minutos. ¿Cómo podrías explicar que el Sol se volviese cuatro veces más brillante en diez minutos? A mí me daría mucho miedo.

Puede que el descubrimiento de variabilidad en esta escala temporal sea el más importante en astronomía de rayos X realizado con la ayuda de globos. Como he mencionado antes, también descubrimos fuentes que los cohetes no podían ver, y fueron hallazgos importantes, pero nada tuvo el impacto de la variabilidad en diez minutos de Sco X-1.

Resultó tan inesperado en ese momento que muchos científicos no podían creerlo. También los científicos tienen firmes expectativas a las que les cuesta enfrentarse. S. Chandrasekhar, el legendario editor de las Astrophysical Journal Letters, envió nuestro artículo a un evaluador, que no se creía en absoluto que hubiésemos hecho ese hallazgo. Más de cuarenta años después, aún recuerdo lo que escribió: «Esto

debe de ser un disparate, porque sabemos que estas potentes fuentes de rayos X no pueden variar en una escala temporal de diez minutos».

Tuvimos que convencer a la revista para que publicase nuestro artículo, exactamente lo mismo que le sucedió a Rossi en 1962. El editor de Physical Review Letters, Samuel Goudsmit, aceptó el artículo seminal de la astronomía de rayos X porque Rossi era Rossi y estaba dispuesto, como escribió más tarde, a asumir la «responsabilidad personal» por los contenidos del artículo.

Hoy en día, como tenemos instrumentos y telescopios mucho más sensibles, sabemos que muchas fuentes de rayos X varían en cualquier escala temporal, lo que significa que, si observas una fuente a diario, verás que su flujo es distinto cada día; si la observas cada segundo, también variará; incluso si analizas los datos milisegundo a milisegundo, detectarás la variabilidad de algunas fuentes. Pero en aquel entonces la variabilidad de diez minutos era nueva e inesperada.

Di una conferencia sobre este hallazgo en el MIT en febrero de 1968 y me encantó ver a Riccardo Giacconi y Herb Gursky entre el público. Sentí que lo había conseguido, que me habían aceptado en la vanguardia de mi campo.

En los capítulos siguientes te mostraré la multitud de misterios que ha resuelto la astronomía de rayos X, así como algunos para los que los astrofísicos aún tratamos de encontrar respuesta. Viajaremos a estrellas de neutrones y nos sumergiremos en las profundidades de los agujeros negros. ¡Agárrate fuerte!

Capítulo 12

Catástrofes cósmicas, estrellas de neutrones y agujeros negros

Las estrellas de neutrones están en pleno centro de la historia de la astronomía de rayos X. Y son realmente estupendas.[52] No en cuanto a su temperatura, en absoluto: en su superficie se pueden alcanzar temperaturas de más de un millón de grados Kelvin, más de cien veces la temperatura de la superficie del Sol.

James Chadwick descubrió el neutrón en 1932 (por lo que recibió el premio Nobel de Física en 1935). Tras su extraordinario hallazgo, que para muchos físicos completaba la imagen de la estructura atómica, Walter Baade y Fritz Zwicky lanzaron la hipótesis de que en las explosiones de supernovas se formaban estrellas de neutrones. Resultó que estaban en lo cierto: las estrellas de neutrones aparecen como resultado de sucesos verdaderamente cataclísmicos al final del ciclo de vida de una gran estrella, uno de los acontecimientos más veloces, espectaculares y violentos en el universo conocido: una supernova por colapso de núcleo.

Una estrella de neutrones no surge de una estrella como el Sol, sino de una al menos ocho veces más masiva. En nuestra galaxia hay unos mil millones de estrellas de neutrones, pero son tantas las estrellas de todo tipo que, pese a esa enorme cantidad, deben considerarse raras.

Como tantos objetos en el mundo —y en el universo—, las estrellas solo pueden «vivir» gracias a su capacidad para alcanzar un equilibrio aproximado entre fuerzas inmensamente poderosas. En las estrellas en las que se produce combustión nuclear, se genera presión desde sus núcleos, donde reacciones termonucleares a decenas de millones de grados Kelvin generan enormes cantidades de energía. La temperatura en el núcleo del Sol es de unos 15 millones de grados Kelvin y produce energía a un ritmo equivalente a más de mil millones de bombas de hidrógeno por segundo.

En una estrella estable, esta presión se compensa bastante aproximadamente con la gravedad que genera su enorme masa. Si estas dos fuerzas —el empujón hacia fuera del horno termonuclear y el tirón hacia dentro de la gravedad— no se

---

[52] El autor juega aquí con el doble significado de la palabra *cool*, que significa al mismo tiempo «estupendas» y «frías». De ahí la frase siguiente. *(N. del T.)*

equilibrasen, la estrella no sería estable. Sabemos que el Sol, por ejemplo, ha vivido ya unos 5.000 millones de años y debería vivir otros tantos más. Cuando las estrellas están a punto de morir, cambian mucho y de forma espectacular. Una vez que han consumido la mayor parte del combustible nuclear que tienen en sus núcleos, muchas, en particular las estrellas más masivas, se enfrentan a las últimas etapas de sus vidas montando, para empezar, un tórrido espectáculo. En cierto sentido, las supernovas se parecen a los héroes de las tragedias teatrales, que suelen terminar sus vidas de excesos en un paroxismo de emoción catártica, a veces violento y con frecuencia estruendoso, que suscita en el público piedad y terror, como decía Aristóteles.

La desaparición estelar más extravagante de todas es la supernova por colapso de núcleo, uno de los fenómenos más energéticos del universo. Trataré de hacerle justicia. Cuando el horno nuclear en el núcleo de una de estas estrellas masivas comienza a apagarse —¡ningún combustible dura para siempre!— y la presión que genera empieza a debilitarse, se impone sobre ella la incesante y perenne fuerza gravitatoria de la masa restante.

El proceso de agotamiento del combustible es en realidad bastante complicado a la par que fascinante. Como la mayoría de las estrellas, las verdaderamente masivas empiezan consumiendo hidrógeno y creando helio. Se alimentan con energía nuclear; no fisión, sino fusión: cuatro núcleos de hidrógeno (protones) se funden en un núcleo de helio a temperaturas extraordinariamente altas y esto genera calor. Cuando estas estrellas se quedan sin hidrógeno, sus núcleos se contraen (debido a la atracción gravitatoria), lo que eleva la temperatura lo suficiente para que puedan empezar a fusionar helio en carbono. Las estrellas cuyas masas son más de diez veces mayores que la del Sol tras consumir carbono pasan al oxígeno, luego al neón, al silicio y finalmente forman un núcleo de hierro.

Tras cada ciclo de combustión, el núcleo se contrae, su temperatura aumenta y comienza el siguiente ciclo. Cada uno de ellos es más corto y produce menos energía que el anterior. Por ejemplo (aunque depende de la masa exacta de la estrella), el ciclo de combustión del hidrógeno se extiende 10 millones de años a una temperatura de 35 millones de grados Kelvin, mientras que el último ciclo, el del silicio, dura solo unos pocos días a una temperatura de 3.000 millones de grados

Kelvin. Durante cada ciclo la estrella consume la mayor parte de los productos del ciclo anterior. ¡Eso sí que es reciclaje!

Se llega al final del camino cuando la fusión del silicio produce hierro, cuyo núcleo es el más estable de todos los elementos de la tabla periódica. La fusión del hierro para producir núcleos todavía más pesados no genera energía, sino que la consume, por lo que el horno de producción de energía se detiene aquí. El núcleo crece rápidamente a medida que la estrella produce cada vez más hierro.

Cuando el núcleo alcanza aproximadamente 1,4 masas solares, llega a una especie de límite mágico, conocido como límite de Chandrasekhar (en honor del gran Chandra). En ese momento, la presión en el núcleo no puede contrarrestar la que ejerce la gravedad y el núcleo colapsa sobre sí mismo, provocando la explosión de una supernova.

Imagina que un gran ejército asedia un castillo que presentaba resistencia y cuyas murallas exteriores comienzan a desmoronarse. (Como en algunas escenas de batallas de las películas de El señor de los anillos, cuando ejércitos de orcos aparentemente infinitos traspasan las murallas.) El núcleo colapsa en milisegundos y la materia que cae sobre él —a velocidades realmente extraordinarias, casi un cuarto de la velocidad de la luz— hace que la temperatura en su interior aumente hasta unos inconcebibles 100.000 millones de grados Kelvin, unas diez mil veces más que el núcleo del Sol.

Si una estrella solitaria tiene entre diez y veinticinco veces la masa del Sol, el colapso crea en su centro un nuevo tipo de objeto: una estrella de neutrones. Las estrellas solitarias cuya masa está entre ocho y diez veces la del Sol también acaban convertidas en estrellas de neutrones, pero la evolución nuclear de su centro (que no comentaremos aquí) difiere de la anterior.

A la elevada densidad del núcleo en colapso, los electrones y los protones se fusionan. La carga negativa de un electrón individual se anula con la carga positiva de un protón y se unen para dar lugar a un neutrón y un neutrino. Dejan de existir núcleos individuales, que desaparecen en una masa de lo que se conoce como materia degenerada de neutrones. (¡Por fin, nombres jugosos!) Me encanta la denominación de la presión compensatoria: presión de degeneración de los neutrones. Si este embrión de estrella de neutrones acumula más de unas tres

veces la masa del Sol, lo que sucede si la masa de la estrella solitaria (llamada progenitora) supera unas veinticinco veces la masa del Sol, la gravedad se impone sobre la presión de degeneración de los neutrones y ¿qué crees que pasa? Adivina.

Supongo que has acertado: qué otra cosa podía ser sino un agujero negro, un lugar donde la materia no puede existir en ninguna forma que seamos capaces de entender; donde, si te acercas, la gravedad es tan fuerte que ninguna radiación puede escapar: ni la luz, ni los rayos X, ni los rayos gamma, ni los neutrinos, nada. La evolución de los sistemas binarios (véase el capítulo siguiente) es muy diferente, porque en ellos el envoltorio de la estrella masiva desaparece en una de las primeras fases, haciendo que la masa del núcleo no crezca tanto como en una estrella solitaria. En ese caso, incluso una estrella que tuviese inicialmente cuarenta veces la masa del Sol podría dar lugar a una estrella de neutrones.

Debe quedar claro que la línea divisoria entre las progenitoras que forman estrellas de neutrones y las que dan lugar a agujeros negros no está muy definida; depende de muchas otras variables, no solo de la masa de la progenitora. Por ejemplo, la rotación estelar también es importante.

Pero los agujeros negros sí que existen —no son invenciones de científicos exaltados y escritores de ciencia ficción— y son increíblemente fascinantes. Tienen mucho que ver con el universo de los rayos X y volveré sobre ellos, lo prometo. De momento, solo diré lo siguiente: no solo son reales, sino que tal vez constituyen el núcleo de toda galaxia medianamente masiva en el universo.

Volvamos al colapso del núcleo. Una vez que se forma la estrella de neutrones —recuerda que hablamos de milisegundos—, la materia estelar que aún intenta incorporarse a ella sale literalmente rebotada, dando lugar a una onda de choque que acabará deteniéndose porque su energía se consumirá en descomponer los núcleos de hierro restantes. (Recuerda que se libera energía cuando los elementos ligeros se fusionan para formar un núcleo de hierro, por lo que romper dicho núcleo consumirá energía.) Cuando los electrones y los protones se fusionan durante el colapso del núcleo para convertirse en neutrones, también se producen neutrinos. Además, a temperaturas del núcleo del orden de 100.000 millones de grados Kelvin, se producen los llamados neutrinos térmicos. Los neutrinos transportan alrededor del 99 por ciento (unos 1046 julios) de toda la energía liberada. El 1 por ciento

restante (1044 julios) se emite principalmente en forma de energía cinética de la materia estelar expulsada.

Los neutrinos, que no tienen carga eléctrica y apenas tienen masa, normalmente atraviesan casi toda la materia, y la mayoría escapan del núcleo. Sin embargo, debido a la densidad extremadamente alta de la materia circundante, le transfieren alrededor del 1 por ciento de su energía, que sale disparada a velocidades de hasta 20.000 kilómetros por segundo. Parte de esta materia se puede ver durante miles de años después de la explosión; es lo que se conoce como resto de nebulosa (la nebulosa del Cangrejo es un ejemplo).

La explosión de una supernova es deslumbrante: su luminosidad óptica en el momento de brillo máximo es de unos 1035 julios por segundo, trescientos millones de veces la luminosidad del Sol, lo que hace que, cuando se produce en nuestra galaxia (cosa que sucede unas dos veces en cada siglo), sea unos de los mayores espectáculos del firmamento. En la actualidad, utilizando telescopios robóticos totalmente automatizados, se descubren entre unos cientos y mil supernovas al año en el gran zoo de las galaxias relativamente cercanas.

Una supernova por colapso de núcleo emite, en alrededor de un segundo, doscientas veces la energía que el Sol ha producido en los últimos 5.000 millones de años, ¡y el 99 por ciento de esa energía se libera en forma de neutrinos!

Eso es lo que sucedió en el año 1054, y la explosión creó la estrella más brillante del firmamento en los últimos mil años, tanto que durante semanas se pudo ver incluso de día. Como un verdadero destello cósmico en el espacio interestelar, la supernova se desvanece en unos pocos años, a medida que el gas se enfría y se dispersa. Pero el gas no desaparece; la explosión de 1054 no solo produjo una estrella de neutrones solitaria, sino también la nebulosa del Cangrejo, uno de los objetos más extraordinarios de todo el firmamento, que aún sigue evolucionando y es una fuente casi inagotable de nuevos datos, imágenes extraordinarias y descubrimientos experimentales. Puesto que mucha de la actividad astronómica tiene lugar en una escala temporal enorme, que más bien parece geológica —millones o miles de millones de años—, resulta emocionante encontrar algo que sucede realmente rápido, en segundos, minutos o incluso años. Hay partes de la nebulosa del Cangrejo que cambian de forma cada pocos días y el telescopio

espacial Hubble y el Observatorio de rayos X Chandra han observado que el resto de la supernova 1987A (situado en la Gran Nube de Magallanes) también cambia de aspecto perceptiblemente.

Tres observatorios de neutrinos distintos situados en la Tierra detectaron simultáneamente brotes de neutrinos provenientes de la supernova 1987A, cuya luz llegó a nosotros el 23 de febrero de 1987. Es tan difícil detectar neutrinos que, entre los tres, estos instrumentos localizaron en total solo veinticinco en trece segundos, de los 300.000 millones (3×10^{14}) que cayeron en ese lapso por cada metro cuadrado de la superficie terrestre que estaba orientada directamente hacia la supernova. Esta lanzó inicialmente del orden de 10^{58} neutrinos, un número inconcebiblemente grande, pero debido a su lejanía respecto a nosotros (alrededor de 170.000 años luz), «solo» llegaron hasta la Tierra unos 4×10^{28} neutrinos, treinta órdenes de magnitud menor.

Alrededor de veinte años antes, la progenitora de la supernova 1987A se había desprendido de una cubierta de gas que había formado anillos alrededor de la estrella, que permanecieron ocultos durante unos ocho meses tras la explosión de la supernova. La velocidad del gas expulsado era relativamente baja —solo unos ocho kilómetros por segundo—, pero a lo largo de los años el radio de la cubierta había llegado a ser de dos tercios de un año luz, alrededor de ocho meses luz.

Unos ocho meses después del estallido de la supernova, la luz ultravioleta proveniente de la explosión (que viajaba a la velocidad de la luz, evidentemente) alcanzó el anillo de materia y lo encendió, por así decir, y el anillo empezó a emitir luz visible. Puedes ver una fotografía de SN 1987A en el cuadernillo.

Pero aún hay más, que tiene relación con los rayos X. El gas expulsado por la supernova en la explosión se desplazó a unos 20.000 kilómetros por segundo, solo unas quince veces menos que la velocidad de la luz. Como sabíamos a qué distancia estaba entonces el anillo, también pudimos predecir aproximadamente cuándo llegaría a él la materia expulsada, cosa que sucedió algo más de once años después y que generó rayos X. Por supuesto, siempre hemos de recordar que, aunque hablamos de ello como si hubiese ocurrido en las últimas décadas, en realidad, puesto que SN 1987A está en la Gran Nube de Magallanes, todo sucedió hace unos 170.000 años.

Hasta la fecha, no se ha detectado ninguna estrella de neutrones en el resto de SN 1987A. Algunos astrofísicos creen que durante el colapso del núcleo se creó un agujero negro, tras la formación inicial de una estrella de neutrones. En 1990 hice una apuesta con Stan Woosley, de la Universidad de California, en Santa Cruz, uno de los mayores expertos en supernovas del mundo, sobre si se descubriría o no una estrella de neutrones en los cinco años siguientes. Perdí los cien dólares.

Pero estos extraordinarios fenómenos tienen también otras consecuencias. En el horno supercaliente de una supernova, las sucesivas fusiones nucleares prensan los núcleos y crean elementos mucho más pesados que el hierro, que terminan en nubes de gas que con el tiempo se fusionan y colapsan en nuevas estrellas y planetas. Los humanos y los demás animales estamos compuestos por elementos que se fabricaron en las estrellas. Sin estos hornos estelares y sin estas explosiones tremendamente violentas, la primera de las cuales fue el propio big bang, nunca habríamos tenido la riqueza de elementos que se pueden ver en la tabla periódica. Así que podemos imaginar que una supernova por colapso de núcleo es como un incendio forestal celestial (pequeño, eso sí) que, al consumir una estrella, crea las condiciones para el nacimiento de nuevas estrellas y planetas.

Se miren como se miren, las estrellas de neutrones son objetos excesivos. Tienen un diámetro de apenas veinte kilómetros (menos que algunos asteroides que orbitan entre Marte y Júpiter), unas cien mil veces menos que el Sol, y tienen, por tanto, una densidad unos 300.000 millones (3×10^{14}) de veces mayor que la densidad media del Sol. Una cucharadita de materia de una estrella de neutrones pesaría en la Tierra unos 100 millones de toneladas.

Una de las cosas que me encantan de las estrellas de neutrones es que simplemente con escribir o decir su nombre se unen los dos extremos de la física, lo diminuto y lo inmenso, cosas tan pequeñas que nunca podremos verlas en cuerpos tan densos que ponen a prueba la capacidad de nuestros cerebros.

Las estrellas de neutrones rotan, algunas de ellas a velocidades asombrosas, sobre todo en los primeros momentos de su existencia. ¿Por qué? Por la misma razón por la que una patinadora sobre hielo que gira con los brazos extendidos se acelera cuando los junta al tronco. Los físicos lo describen diciendo que el momento angular se conserva. Explicar el momento angular en detalle es algo complicado, pero la

idea es fácil de entender.

¿Qué tiene eso que ver con las estrellas de neutrones? Solo esto: todos los objetos del universo rotan, incluida la estrella que colapsa en una estrella de neutrones. Expulsa la mayor parte de su materia en la explosión, pero se queda con una o dos masas solares, concentradas ahora en un objeto varios miles de veces más pequeño que el tamaño del núcleo antes del colapso. Como el momento angular se conserva, la frecuencia de rotación de las estrellas de neutrones tiene que incrementarse al menos en un millón de veces.

Las dos primeras estrellas de neutrones que descubrió Jocelyn Bell (véase infra) rotaban sobre sus ejes en alrededor de 1,3 segundos. La estrella de neutrones de la nebulosa del Cangrejo lo hace unas 30 veces por segundo, mientras que la más rápida que se ha descubierto hasta ahora rota unas asombrosas 716 veces por segundo. Eso significa que la velocidad de rotación en el ecuador de la estrella es aproximadamente del 15 por ciento de la velocidad de la luz.

El hecho de que todas las estrellas de neutrones giren, y de que muchas tengan potentes campos magnéticos, da lugar a un importante fenómeno estelar conocido como púlsares (abreviatura de pulsating stars, «estrellas pulsantes»). Los púlsares son estrellas de neutrones que emiten haces de ondas de radio desde sus polos magnéticos, que son, como sucede en la Tierra, notablemente distintos de sus polos geográficos (los extremos del eje alrededor del cual rota la estrella). El haz de radio del púlsar barre el firmamento a medida que la estrella gira. Para un observador en la trayectoria del haz, la estrella emite pulsos a intervalos regulares, en los que el observador solo ve el haz durante un breve instante. Los astrónomos a veces lo llaman efecto faro, por motivos obvios. Se conocen media docena de estrellas de neutrones solitarias (no las confundas con las estrellas de neutrones en sistemas binarios), que emiten pulsos en un rango extremadamente amplio del espectro electromagnético, que incluye las ondas de radio, la luz visible, los rayos X y los rayos gamma. El púlsar de la nebulosa del Cangrejo es una de ellas.

Jocelyn Bell descubrió el primer púlsar en 1967, cuando era estudiante de doctorado en Cambridge, Inglaterra. Ni ella ni su director de tesis, Antony Hewish, supieron al principio cómo interpretar la regularidad de las pulsaciones, que duraban alrededor de 0,04 segundos, con una separación aproximada entre ellas de 1,3373 segundos

(el llamado período del púlsar). En un principio, lo llamaron LGM-1, de «Little Green Men» («pequeños hombrecillos verdes»), haciendo alusión a la posibilidad de que las pulsaciones regulares fuesen producto de formas de vida extraterrestre. Poco después, Bell descubrió un segundo LGM con un período de alrededor de 1,2 segundos, y quedó claro que los pulsos no los creaba ningún extraterrestre (¿por qué enviarían dos civilizaciones completamente diferentes señales a la Tierra con períodos tan parecidos?). Poco después de que Bell y Hewish publicasen sus resultados, Thomas Gold, de la Universidad Cornell, se dio cuenta de que los púlsares eran estrellas de neutrones en rotación.

Agujeros negros

Ya te he dicho que llegaríamos aquí. Por fin ha llegado el momento de explorar directamente estos extraños objetos. Entiendo por qué hay gente que les tiene miedo; si pasas un rato en YouTube, verás decenas de «recreaciones» de cómo pueden ser, la mayoría de las cuales entran en la categoría de «estrellas de la muerte» o «devoradores de estrellas». En la imaginación popular, los agujeros negros son formidables sumideros cósmicos, destinados a engullir todas las cosas en sus fauces insaciables.

Pero la idea de que un agujero negro supermasivo se traga todo lo que hay a su alrededor es completamente equivocada. Hay objetos de muchos tipos, sobre todo estrellas, que orbitan con gran estabilidad alrededor de un agujero negro de masa estelar, e incluso de uno supermasivo. Si no fuese así, nuestra propia Vía Láctea habría desaparecido en el enorme agujero negro que hay en su centro, cuya masa es cuatro millones de veces la del Sol.

¿Qué sabemos de estas extrañas bestias? Una estrella de neutrones solo puede llegar a contener unas tres veces la masa del Sol antes de que la atracción gravitatoria haga que colapse y forme un agujero negro. Si la masa de la estrella solitaria de combustión nuclear originaria superase unas veinticinco veces la del Sol, cuando se produjese el colapso de su núcleo, la materia, en lugar de terminar formando una estrella de neutrones, seguiría colapsándose. ¿El resultado? Un agujero negro.

Si los agujeros negros forman sistemas binarios en los que los acompaña una

estrella, podemos medir su efecto gravitatorio a partir de la trayectoria visible de esta, y en casos excepcionales podemos incluso calcular sus masas. (Hablaré de estos sistemas en el capítulo siguiente.)

En lugar de superficie, un agujero negro tiene lo que los astrónomos llaman un horizonte de sucesos, la frontera espacial en la que su atracción gravitatoria es tan fuerte que nada, ni siquiera la radiación electromagnética, puede escapar al campo gravitatorio. Ya sé que esto no tiene mucho sentido, así que imagina que un agujero negro es como una bola pesada en mitad de una plancha de caucho, que hace que el centro se combe. Si no tienes una plancha de caucho a mano, prueba a utilizar unas medias o unos pantys viejos. Recorta un trozo cuadrado lo más grande que puedas, pon una piedra en el centro y levántalo de los lados. Verás como la piedra crea una depresión con forma de embudo, que recuerda a la manga de un tornado. Acabas de crear la versión tridimensional de lo que sucede en cuatro dimensiones en el espacio-tiempo. Los físicos llaman a la depresión pozo gravitatorio, porque se asemeja al efecto que tiene la gravedad sobre el espacio-tiempo. Si cambias la piedra por una roca más grande, crearás un pozo más profundo, lo que indica que un objeto más masivo provoca una distorsión mayor del espacio-tiempo.

Como solo podemos pensar en tres dimensiones, somos incapaces de visualizar cómo es el embudo que crea una estrella en el espacio-tiempo tetradimensional. Fue Albert Einstein quien nos enseñó a pensar sobre la gravedad de esta manera, como la curvatura del espacio-tiempo, transformándola en un problema de geometría, aunque no de la que aprendiste en secundaria.

El experimento con los pantys no es ideal —seguro que os alivia saberlo— por varias razones, pero la principal es que no puedes imaginarte una canica en una órbita estable alrededor del pozo gravitatorio que provoca la roca. Sin embargo, en la vida astronómica real, muchos objetos siguen órbitas estables alrededor de cuerpos masivos incluso durante miles de millones de años. Igual que, por ejemplo, la Luna órbita alrededor de la Tierra, la Tierra alrededor del Sol o el Sol y otros 100.000 millones de estrellas lo hacen en nuestra propia galaxia.

Por otro lado, la demostración sí que nos ayuda a visualizar un agujero negro. Por ejemplo, podemos ver que cuanto más masivo es el objeto más profundo es el pozo y más empinadas sus paredes, y por tanto mayor es la cantidad de energía

necesaria para salir de él. Incluso la radiación electromagnética ve reducida su energía al escapar de la gravedad de una estrella masiva, lo que significa que su frecuencia decrece y su longitud de onda se hace más larga. Ya sabes que llamamos desplazamiento hacia el rojo a la variación hacia la parte menos energética del espectro electromagnético. En el caso de una estrella compacta (masiva y pequeña), se produce un desplazamiento hacia el rojo debido a la gravedad, llamado desplazamiento hacia el rojo gravitatorio (que no hay que confundir con el desplazamiento hacia el rojo debido al efecto Doppler; véanse el capítulo 2 y el capítulo siguiente).

Para escapar de la superficie de un planeta o una estrella, es necesaria una velocidad mínima para no volver a caer, la llamada velocidad de escape, que en el caso de la Tierra es de unos 11 kilómetros por segundo (40.000 kilómetros por hora). Por lo tanto, los satélites terrestres no deben superar esta velocidad. Cuanto mayor es la velocidad de escape, mayor es la energía, ya que esta depende tanto de la velocidad como de la masa, m, de los objetos que quieren escapar (la energía cinética necesaria es $\frac{1}{2}\, mv^2$).

Puede que pienses que si el pozo gravitatorio se hace extremadamente profundo la velocidad de escape podría llegar a ser superior a la de la luz, pero como eso no es posible, significa que nada puede escapar de un pozo gravitatorio muy profundo, ni siquiera la radiación electromagnética.

Un físico llamado Karl Schwarzschild resolvió las ecuaciones de Einstein de la relatividad general y calculó cuál sería el radio de una esfera de una masa determinada cuyo pozo fuese tan profundo que nada pudiera escapar: un agujero negro. Se conoce como el radio de Schwarzschild y su tamaño depende de la masa del objeto; es el radio del horizonte de sucesos.

La ecuación en sí es de una sencillez impresionante, pero solo es válida para agujeros negros que no rotan, llamados habitualmente agujeros negros de Schwarzschild[53]. La ecuación contiene constantes bien conocidas y se obtiene un radio de algo menos de 3 kilómetros por cada masa solar. Así es como se puede calcular que el tamaño —es decir, el radio del horizonte de sucesos— de un agujero negro de, por ejemplo, diez masas solares es de unos 30 kilómetros. También

[53] En los agujeros negros que rotan el horizonte de sucesos es ovalado —más ancho en el ecuador—, no esférico.

podemos calcular el radio del horizonte de sucesos de un agujero negro con la masa de la Tierra —que sería de poco menos de un centímetro—, pero no hay constancia de que existan agujeros negros así. De forma que, si la masa del Sol estuviese concentrada en una esfera de 6 kilómetros de diámetro, sería como una estrella de neutrones, ¿no? Pues no: bajo la atracción gravitatoria de tal cantidad de masa apiñada en una esfera tan pequeña, la materia del Sol colapsaría en un agujero negro.

Mucho antes de Einstein, en 1748, el filósofo y geólogo inglés John Michell demostró que existían estrellas cuya atracción gravitatoria eran tan grande que la luz no podía escapar. Utilizó mecánica newtoniana sencilla (cualquiera de mis alumnos de primer año puede hacerlo en treinta segundos) y llegó al mismo resultado que Schwarzschild: si una estrella tiene una masa de N veces la del Sol y su radio es menor de 3N kilómetros, la luz no puede escapar. Es una coincidencia extraordinaria que la teoría de la relatividad general de Einstein dé el mismo resultado que un sencillo cálculo newtoniano.

En el centro del horizonte de sucesos esférico existe lo que los físicos llaman una singularidad, un punto de volumen nulo y densidad infinita, una cosa extraña que solo representa la solución a las ecuaciones, nada que podamos entender. A pesar de nuestras fantasías, nadie tiene ni idea de cómo es realmente una singularidad. No tenemos física (aún) para manejar las singularidades.

En la web puedes ver muchos vídeos de agujeros negros, la mayoría a la vez hermosos e inquietantes, pero prácticamente todos increíblemente grandes, evocando una destrucción a escala cósmica. Por eso, cuando los periodistas empezaron a escribir sobre la posibilidad de que el mayor acelerador de partículas del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC: Large Hadron Collider) del CERN[54], cerca de Ginebra, fuese capaz de crear un agujero negro, generaron bastante preocupación entre los no científicos, que imaginaban que los físicos estaban jugando con el futuro del mundo.

Pero ¿era así? Supongamos que, accidentalmente, hubiesen creado un agujero negro, ¿habría empezado a tragarse la Tierra? La respuesta es bastante fácil de

[54] Siglas de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, es decir, Consejo Europeo para la Investigación Nuclear, denominación antigua, pero aún mayoritariamente utilizada, de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, el laboratorio de física de partículas más importante del mundo. *(N. del T.)*

calcular. El nivel de energía con el que los haces opuestos de protones chocaron en el LHC el 30 de marzo de 2010 fue de 7 teraelectronvoltios (TeV), 7 billones de electronvoltios, 3,5 billones por cada haz. En el futuro, los científicos del LHC tienen pensado conseguir colisiones de 14 TeV, muy lejos de lo que es posible hoy en día. La masa de un protón es de alrededor de 1.000 millones de electronvoltios, 1 GeV. Por supuesto, GeV es energía, no masa, pero como $E = mc^2$ (donde c es la velocidad de la luz), a menudo se habla de E como «la masa». En la autopista de Massachusetts hay carteles que dicen: «Llame al 511 para información sobre el tráfico». Siempre que los veo pienso en electrones, porque la masa del electrón es de 511 keV.

Suponiendo que toda la energía de la colisión de 14 TeV se invirtiese en crear el agujero negro, tendría una masa de unas 14.000 veces la del protón, o unos 2 × 10-20 gramos. Una legión de físicos y comités de revisión estudiaron una montaña de documentación sobre el asunto, publicaron sus resultados y llegaron a la conclusión de que no había de qué preocuparse. Quieres saber por qué, ¿verdad? De acuerdo, estos son sus argumentos.

Primero, los escenarios en los que el LHC tendría energía suficiente para crear agujeros negros tan pequeños (llamados microagujeros negros) se basan en la teoría de las llamadas dimensiones adicionales grandes que, como mínimo, sigue siendo altamente especulativa. Esta teoría va mucho más allá de cualquier cosa que se haya confirmado experimentalmente. Así que, para empezar, la probabilidad de crear microagujeros negros es extraordinariamente baja.

Obviamente, lo preocupante sería que estos microagujeros negros fuesen de alguna forma «acretores» estables —objetos capaces de crecer a base de recolectar y acumular materia— que empezasen a engullir toda la materia cercana y, con el tiempo, la propia Tierra. Pero si existiesen estos microagujeros negros estables, ya se habrían creado dentro de estrellas de neutrones y enanas blancas cuando rayos cósmicos de altísima energía (que sí que existen) inciden sobre ellas. Y como las enanas blancas y las estrellas de neutrones parecen ser estables en una escala temporal de cientos, e incluso miles, de millones de años, no da la impresión de que diminutos agujeros negros las estén devorando desde su interior. En otras palabras, la amenaza de los microagujeros negros parece nula.

Por otra parte, fuera de la teoría de las dimensiones adicionales ni siquiera se pueden crear agujeros negros de masas menores de 2×10^{-5} gramos (llamada masa de Planck). Es decir, no hay física (aún) para tratar con agujeros negros de masa tan pequeña; necesitaríamos una teoría cuántica de la gravitación que no existe. De ahí que la pregunta de cuál sería el radio de Schwarzschild de un microagujero negro de 2×10^{-20} gramos tampoco tenga sentido.

Stephen Hawking ha demostrado que los agujeros negros pueden evaporarse. Cuanto menor sea su masa, más rápido se evaporarán. Un agujero negro de 30 masas solares se evaporaría en unos 1071 años. ¡Un agujero negro supermasivo de 1.000 millones de masas solares duraría unos 10^{93} años! Así que te preguntarás: ¿cuánto tardaría en evaporarse un microagujero negro de 2×10^{-20} gramos? Es una muy buena pregunta, pero nadie sabe la respuesta, porque la teoría de Hawking no sirve para agujeros negros cuya masa sea menor que la de Planck. Pero, solo por curiosidad, la vida media de un agujero negro de 2×10^{-5} gramos es de unos 10^{-39} segundos. Así que parece que se evaporan en menos tiempo del que se tarda en producirlos, es decir, ni siquiera se pueden producir.

Es evidente que no parece necesario preocuparse por los posibles microagujeros negros de 2×10^{-20} gramos del LHC.

Aun así, esto no evitó que la gente denunciase al LHC para impedir que se pusiese en funcionamiento. Me preocupa la brecha entre los científicos y el resto de la humanidad y lo pésimamente que hemos explicado lo que hacemos. Incluso cuando algunos de los mejores físicos del mundo estudiaron el asunto y explicaron por qué no había ningún problema serio, los periodistas y los políticos se inventaron situaciones y alimentaron los temores de la opinión pública sin apenas base alguna. La ciencia ficción, en cierto sentido, parece tener más fuerza que la propia ciencia.

Creo que no hay nada más extraño que un agujero negro. Una estrella de neutrones al menos se hace notar a través de su superficie. Una estrella de neutrones dice, de alguna forma: «Aquí estoy y puedo demostrarte que tengo superficie». Un agujero negro no tiene superficie y no emite absolutamente nada (aparte de la radiación de Hawking, que nunca se ha observado).

Uno de los grandes misterios por resolver es por qué algunos agujeros negros, rodeados por un anillo aplanado de materia conocido como disco de acreción (véase

el capítulo siguiente), disparan chorros de partículas de energía extraordinariamente alta perpendiculares al plano del disco, aunque desde fuera del horizonte de sucesos[55].

Tenemos que derivar matemáticamente todo lo que hay en el interior de un agujero negro, dentro del horizonte de sucesos. Al fin y al cabo, nada puede salir, por lo que no recibimos ninguna información desde el interior (algunos físicos con sentido del humor lo llaman «censura cósmica»). El agujero negro se esconde en su propia cueva. Una vez que atraviesas el horizonte de sucesos, nunca puedes salir, ni siquiera puedes enviar una señal hacia fuera. Si hubieses caído a través del horizonte de sucesos de un agujero negro supermasivo, ni siquiera sabrías que lo has atravesado. No pasas sobre un foso, un muro o un saliente, nada cambia abruptamente en tu entorno local cuando atraviesas el horizonte. A pesar de toda la física relativista que entra en juego, si miras el reloj no verás que se para, ni parecerá que se acelera o se ralentiza.

Para alguien que te mire desde la distancia, la situación es muy distinta. Lo que ven no eres tú; sus ojos reciben imágenes de ti transportadas por la luz que parte de tu cuerpo y escapa del pozo gravitatorio del agujero negro. A medida que te acercas al horizonte, el pozo se hace más profundo. La luz tiene que emplear una parte mayor de su energía para salir de él y experimenta un mayor desplazamiento hacia el rojo gravitatorio. Toda la radiación electromagnética emitida se desplaza hacia longitudes de onda cada vez más largas (frecuencias más bajas). Se te vería cada vez más rojo y acabarías desapareciendo, a medida que tus emisiones se fuesen desplazando hacia longitudes de onda cada vez más largas, como la luz infrarroja y después ondas de radio cada vez más largas y todas las longitudes de onda tenderían al infinito cuando cruzaras el horizonte de sucesos. Así, para el observador remoto, habrías desaparecido prácticamente antes incluso de que hubieses atravesado el umbral.

El observador remoto también mediría algo completamente inesperado: ¡la luz viaja más despacio cuando proviene de una región cercana al agujero negro! Esto no viola ningún postulado de la relatividad: para los observadores locales cercanos al agujero negro, la luz siempre viaja a la misma velocidad c (casi 300.000 kilómetros

[55] Échale un vistazo a esta imagen en www.wired.com/wireds cience/2009/01/spectacular-new/

por segundo). Pero observadores alejados medirían una velocidad de la luz menor que c. Las imágenes de ti que transporta la luz que emitiste hacia el observador remoto tardan más en llegar a él que si no estuvieses cerca de un agujero negro. Esto tiene una consecuencia muy interesante: ¡el observador ve cómo te ralentizas al acercarte al horizonte! En la práctica, tus imágenes tardan cada vez más en llegar a él, por lo que todo lo que te rodea parece ir a cámara lenta. Para un observador en la Tierra, tu velocidad, tus movimientos, tu reloj, incluso los latidos de tu corazón, se ralentizan a medida que te acercas al horizonte, deteniéndose por completo cuando llegas a él. Si no fuese porque la luz que emites cerca del horizonte se vuelve invisible debido al desplazamiento hacia el rojo gravitatorio, un observador te vería «congelado» para toda la eternidad en la superficie del horizonte de sucesos.

Para simplificar, he estado ignorando el efecto Doppler, que sería enorme, porque tu velocidad no deja de aumentar a medida que te acercas al horizonte de sucesos. De hecho, cuando lo cruces te estarás moviendo a la velocidad de la luz. (Para un observador en la Tierra, el resultado de este efecto Doppler será similar al del desplazamiento hacia el rojo gravitatorio.)

Una vez que hayas cruzado el horizonte de sucesos, cuando ya no puedas comunicarte con el mundo exterior, aún seguirás siendo capaz de ver hacia fuera. La luz que venga del exterior hacia el horizonte de sucesos sufrirá un desplazamiento gravitatorio hacia frecuencias más altas (y longitudes de onda más cortas), así que verás un universo desplazado hacia el azul. (Lo mismo sucedería, y por la misma razón, si pudieses mantenerte sobre la superficie de una estrella de neutrones.) No obstante, como estás cayendo a gran velocidad, el mundo exterior se alejará de ti, y por tanto al mismo tiempo sufrirá un desplazamiento hacia el rojo (debido al efecto Doppler). ¿Cuál será el resultado? ¿Prevalecerá el desplazamiento hacia el azul, hacia el rojo, o ninguno?

Le planteé esta pregunta a Andrew Hamilton, del Instituto Conjunto de Astrofísica de Laboratorio (JILA)[56], en la Universidad de Colorado, una autoridad mundial en agujeros negros y, como me esperaba, la respuesta no es tan sencilla. Ambos

[56] El Instituto Conjunto de Astrofísica de Laboratorio es uno de los principales centros de investigación en física de Estados Unidos.

desplazamientos se anulan aproximadamente para alguien en caída libre, pero el mundo exterior parece desplazarse hacia el azul en las direcciones horizontales y hacia el rojo por encima y por debajo de ellas[57].

Sin embargo, no habría dónde apoyarse, ya que no hay ninguna superficie. Toda la materia creada por el agujero negro ha colapsado en un punto, una singularidad. ¿Qué pasa con las fuerzas de las mareas? ¿No te destrozaría la diferencia en la fuerza gravitatoria entre tu cabeza y tus pies? (Es el mismo efecto que se produce cuando la cara de la Tierra que mira hacia la Luna experimenta una mayor fuerza de atracción que la otra cara, más alejada; es lo que provoca las mareas en la Tierra.)

En efecto, acabarías hecho trizas. Un agujero negro de Schwarzschild de 3 masas solares te destrozaría 0,15 segundos antes de que atravesases el horizonte de sucesos. Este fenómeno se denomina, muy gráficamente, «espaguetificación», y significa que tu cuerpo se estiraría más allá de lo imaginable. Una vez que hubieses cruzado el horizonte de sucesos, los distintos pedazos de tu cuerpo llegarían a la singularidad en aproximadamente 0,00001 segundos, momento en el cual acabarías aplastado en un punto de densidad infinita. En un agujero negro de 4 millones de masas solares, como el que existe en el centro de nuestra galaxia, atravesarías el horizonte de sucesos sin problemas, al menos al principio, pero tarde o temprano acabarías despedazado al estilo de los espaguetis. (Y sería más bien «temprano», porque solo pasarían 13 segundos, y 0,15 segundos después llegarías a la singularidad.)

La idea de los agujeros negros es realmente extraña para cualquiera, pero en particular para los muchos astrónomos que los observan (como mis antiguos estudiantes de doctorado Jeffrey McClintock y Jon Miller). Sabemos que existen agujeros negros de masa estelar. Se descubrieron en 1971, cuando astrónomos ópticos demostraron que Cyg X-1 es un sistema estelar binario y que una de las dos estrellas es un agujero negro. Te lo contaré en el capítulo siguiente. ¿Preparado?

---

[57] Seguro que te gusta ver su serie de vídeos titulada «Journey into a Schwarzschild black hole» («Viaje hacia el interior de un agujero negro de Schwarzschild») para hacerte una idea de lo que experimentaría un objeto que cayese en un agujero negro: http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/schw.html.

Capítulo 13
Ballet celestial

A estas alturas, no te sorprenderá saber que muchas de las estrellas que ves en el firmamento, con o sin telescopio de cualquier tipo, son mucho más que versiones distantes de nuestro Sol, que nos resulta tan familiar. Quizá no sepas que alrededor de un tercio de las estrellas que ves ni siquiera son estrellas solitarias, sino binarias: pares de estrellas unidas por la fuerza gravitatoria que orbitan cada una alrededor de la otra. Es decir, cuando miras al cielo nocturno aproximadamente un tercio de las estrellas que ves son sistemas binarios, aunque a ti te parezcan estrellas individuales. Existen incluso sistemas estelares triples —tres estrellas que orbitan las unas alrededor de las otras—, aunque no son ni mucho menos tan habituales. Como muchas de las fuentes de rayos X en nuestra galaxia resultaron ser sistemas binarios, tuve mucho contacto con ellos. Son fascinantes.

Cada estrella en un sistema binario órbita alrededor del llamado centro de masas del binario, un punto situado entre las dos estrellas. Si ambas tienen igual masa, el centro de masas está a la misma distancia del centro de cada una de las estrellas; si no, está más cerca de la más masiva. Como ambas tardan exactamente el mismo tiempo en completar una órbita, la estrella más masiva ha de tener una velocidad orbital menor que la menos masiva.

Para visualizar este principio, imagínate unas pesas en las que una barra conecta dos extremos con la misma masa y que rotan sobre su punto medio. Imagínate ahora otras pesas con un kilo en un extremo y cinco en el otro. El centro de masas de estas segundas pesas está bastante cerca del extremo más pesado, así que cuando rota puedes ver cómo la masa mayor describe una órbita más pequeña, mientras que la masa menor tiene que recorrer un espacio mayor en el mismo tiempo. Si en lugar de pesas se trata de estrellas, entenderás cómo la estrella de menor masa recorre su órbita a toda velocidad, cinco veces más rápido que su compañera más pesada y torpe.

Si una de las estrellas es mucho más masiva que su compañera, el centro de masas del sistema puede incluso estar situado en el interior de la primera. En el caso de la Tierra y la Luna (que es un sistema binario), el centro de masas está unos 1.700

kilómetros por debajo de la superficie terrestre. (Comento este hecho en el Apéndice 2.)

Sirio, la estrella más brillante del firmamento (a unos 8,6 años luz de nosotros), es un sistema binario compuesto por dos estrellas llamadas Sirio A y Sirio B. Completan una órbita alrededor de su centro de masas común aproximadamente una vez cada cincuenta años (su período orbital).

¿Cómo podemos saber si estamos viendo un sistema binario? No podemos ver los componentes del binario por separado a simple vista, pero si utilizamos un telescopio, dependiendo de su potencia y de la distancia a la que se encuentre el sistema, en algunos casos sí podemos tener confirmación visual, al ver las dos estrellas separadas.

El famoso matemático y astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel predijo que la estrella más brillante del firmamento, Sirio, era un sistema binario, compuesto por una estrella visible y otra invisible. Llegó a esta conclusión basándose en precisas observaciones astronómicas (fue el primero, en 1838, en hacer mediciones del paralaje, adelantándose por poco a Henderson; véase el capítulo 2). En 1844 escribió una famosa carta a Alexander von Humboldt: «Me adhiero a la convicción de que la estrella Sirio es un sistema binario compuesto por una estrella visible y otra invisible. No hay razón para suponer que la luminosidad es una cualidad esencial de los cuerpos cósmicos. La visibilidad de innumerables estrellas no es un argumento en contra de la invisibilidad de otras». Esta es una afirmación de mucha profundidad; normalmente, no creemos en lo que no podemos ver. Bessel inauguró lo que ahora conocemos como astronomía de lo invisible.

Nadie vio la compañera «invisible» (llamada Sirio B) hasta 1862, cuando Alvan Clark estaba probando un nuevo telescopio de 47 centímetros (el más grande de la época, fabricado por la empresa de su padre) en mi pueblo, Cambridge, Massachusetts. Haciendo una prueba, apuntó el telescopio hacia Sirio cuando aparecía sobre el horizonte de Boston y descubrió Sirio B (que era unas diez mil veces menos brillante que Sirio A).

Gracias a dios por la espectroscopía estelar: desplazamientos hacia el azul y el rojo

El método más común, con diferencia, para determinar si las estrellas son binarias, sobre todo si están lejos, es la espectroscopía y la medición de lo que se conoce como efecto Doppler. Puede que no exista una herramienta más potente que la espectroscopía, ni un descubrimiento más importante en astronomía en los últimos siglos que el efecto Doppler.

Ya sabes que cuando los objetos alcanzan una temperatura suficiente emiten luz visible (radiación del cuerpo negro). Si se descompone la luz solar como lo hace un prisma, las gotas de lluvia que componen un arco iris (véase el capítulo 5) muestran un continuo de colores, desde el rojo en un extremo al violeta en el otro, llamado espectro. Si se descompone la luz de una estrella también se observa un espectro, pero puede que no contenga todos los colores con la misma intensidad. Cuanto más fría esté la estrella, por ejemplo, más roja será (y su espectro también). La temperatura de Betelgeuse (en la constelación de Orión) es de solo 2.000 grados Kelvin; es una de las estrellas más rojas del firmamento. En el otro extremo, la temperatura de Bellatrix, conocida como Estrella Amazona, también en Orión, es de 28.000 grados Kelvin; es una de las estrellas más azules y brillantes.

Al observar en detalle los espectros estelares se pueden ver estrechos huecos, las llamadas líneas de absorción, donde los colores son muy débiles o incluso están completamente ausentes. En el espectro del Sol se pueden ver miles de líneas de absorción. Se deben a los distintos elementos que constituyen las atmósferas de las estrellas. Los átomos, como sabes, se componen de núcleos y electrones. Los electrones no pueden tener una energía arbitraria, sino que poseen niveles de energía discretos y no pueden tener energías intermedias. Dicho de otro modo, sus niveles de energía están «cuantizados» (término que está en el origen de la mecánica cuántica).

El hidrógeno neutro tiene un electrón. Si se bombardea con luz, este electrón puede saltar de un nivel de energía a otro más alto al absorber la energía de un fotón. Pero debido a la cuantización de los niveles de energía del electrón, este fenómeno no puede producirse con fotones de una energía arbitraria, sino solo con los que tienen la energía adecuada (y, por tanto, exactamente la frecuencia y la longitud de onda apropiadas) para que el electrón dé el salto cuántico de un nivel a otro. Este proceso (llamado absorción de resonancia) elimina estos fotones y provoca una

ausencia en esa frecuencia en el espectro continuo, la línea de absorción.

El hidrógeno puede producir cuatro líneas de absorción en la parte visible del espectro estelar (a longitudes de onda, o colores, conocidas con precisión). La mayoría de los elementos producen muchas más líneas, porque tienen muchos más los electrones que el hidrógeno. De hecho, cada elemento posee una combinación única de líneas de absorción, que viene a ser su huella digital. Las conocemos muy bien, porque las hemos estudiado y medido en el laboratorio. De esta forma, un estudio cuidadoso de las líneas de absorción en un espectro estelar puede revelarnos qué elementos están presentes en la atmósfera de la estrella.

Sin embargo, cuando una estrella se aleja de nosotros, el fenómeno conocido como efecto Doppler hace que todo el espectro de la estrella (incluidas las líneas de absorción) se desplace hacia la zona roja del espectro electromagnético (es lo que se llama desplazamiento hacia el rojo). Si, por el contrario, el espectro se ha desplazado hacia el azul, sabemos que la estrella se está acercando. Midiendo con precisión la magnitud del desplazamiento de las líneas de absorción de una estrella podemos calcular la velocidad a la que se mueve con respecto a nosotros.

Si observamos un sistema binario, por ejemplo, cada estrella se acerca a nosotros durante la mitad de su órbita y se aleja durante la otra mitad, mientras que su compañera hace justo lo contrario. Si ambas son los suficientemente brillantes, en el espectro observamos líneas de absorción desplazadas tanto hacia el rojo como hacia el azul, lo que nos indica que estamos viendo un sistema binario. Pero las líneas de absorción se mueven en el espectro, debido al desplazamiento orbital de las estrellas. Por ejemplo, si el período orbital es de veinte años, ese es el tiempo que tarda cada línea de absorción en completar su periplo (diez años de desplazamiento hacia el rojo y otros diez hacia el azul).

Si solo vemos líneas de absorción desplazadas hacia el rojo (o hacia el azul), sabemos que se trata de un sistema binario si las líneas se desplazan hacia un extremo del espectro y después hacia el otro; midiendo el tiempo que tardan en completar su ciclo podremos saber el período orbital de la estrella. ¿Cuándo sucede esto? En el caso en que la luz de una de las estrellas es demasiado tenue como para ser visible desde la Tierra.

Volvamos ahora a nuestras fuentes de rayos X.

Shklovski y más allá

En 1967 el físico ruso Iósiv Shklovski propuso un modelo para Sco X-1. «Por todas sus características, este modelo corresponde a una estrella de neutrones en estado de acreción […] el suministro de gas, natural y muy eficiente, para esa acreción es una corriente que fluye desde el componente secundario de un sistema binario cercano hacia el componente primario que es la estrella de neutrones.»

Ya me imagino que estas frases no te habrán impresionado. No ayuda el hecho de que estén escritas en el lenguaje técnico y bastante seco de la astrofísica. Pero así es como los profesionales de casi cualquier campo hablan entre ellos. Mi propósito en el aula, y el motivo principal por el que he escrito este libro, es el de traducir los descubrimientos verdaderamente asombrosos, innovadores, a veces incluso revolucionarios, de mis colegas físicos a conceptos y palabras que personas profanas en la materia, pero inteligentes y curiosas, puedan comprender; tender un puente entre el mundo de los científicos profesionales y el tuyo. Con demasiada frecuencia, parece que preferimos dirigirnos solo a nuestros colegas y hacemos que entrar en nuestro mundo le resulte extraordinariamente difícil a la mayoría de la gente, incluso a quienes realmente quieren entender la ciencia.

Así que partamos de la idea de Shklovski y veamos qué proponía: un sistema estelar binario compuesto por una estrella de neutrones y una compañera desde la que fluía materia hacia la estrella. Esta estaría entonces «en estado de acreción», es decir, acumulando materia proveniente de su compañera, la estrella donante. Una idea bastante extraña, ¿no?

Resultó que Shklovski tenía razón. Lo curioso es que, en ese momento, él solo se refería a Sco X-1 y la mayoría de nosotros no nos tomamos su idea demasiado en serio. Es algo que sucede a menudo con la física teórica. No creo que ofenda a ninguno de mis colegas teóricos al decir que la inmensa mayoría de las teorías en astrofísica acaban resultando erróneas. Así que es normal que los físicos experimentales no les prestemos demasiada atención a la mayoría de ellas.

Resulta que las estrellas de neutrones en acreción constituyen en efecto el entorno perfecto para la generación de rayos X. ¿Cómo descubrimos que Shklovski tenía razón?

Hasta principios de la década de 1970, los astrónomos no consiguieron confirmar la naturaleza binaria de algunas de las fuentes de rayos X (pero eso no significaba necesariamente que se tratase de estrellas de neutrones en acreción). La primera fuente en revelar sus secretos fue Cyg X-1, que resultó ser una de las más importantes de toda la astronomía de rayos X. Descubierta durante un vuelo con cohete en 1964, es una fuente de rayos X muy brillante y potente, por lo que ha atraído la atención de muchos astrónomos desde entonces.

Los radioastrónomos descubrieron en 1971 ondas de radio provenientes de Cyg X-1. Sus radiotelescopios delimitaron la posición de Cyg X-1 en una región (una caja de error) de unos 350 segundos de arco al cuadrado, unas veinte veces menor de lo que habría sido posible a partir de sus rayos X. Buscaron su equivalente óptica, es decir, querían observar, con luz visible, la estrella que estaba generando los misteriosos rayos X.

En la caja de error de rayos X había una supergigante azul muy brillante llamada HDE 226868. Habida cuenta del tipo de estrella del que se trataba, los astrónomos podían compararla con otras muy similares y estimar su masa con una precisión bastante buena. Cinco astrónomos, incluido el famoso Allan Sandage, llegaron a la conclusión de que HDE 226868 era simplemente una «supergigante B0 normal, sin peculiaridades», e ignoraron el hecho de que se trataba del equivalente óptico de Cyg X-1. Otros (por aquel entonces menos famosos) astrónomos ópticos examinaron la estrella con más atención y realizaron varios descubrimientos trascendentales.

Descubrieron que la estrella pertenecía a un sistema binario con un período orbital de 5,6 días. Afirmaron, correctamente, que el fuerte flujo de rayos X de este sistema binario se debía a la acreción de gas proveniente de la estrella óptica (la donante) a un objeto muy pequeño y compacto. Solo una corriente de gas hacia un objeto masivo pero muy pequeño permitía explicar el copioso flujo de rayos X.

Realizaron mediciones de la magnitud del efecto Doppler sobre las líneas de absorción en el espectro de la estrella donante a medida que se movía en su órbita (recuerda: cuando se acercan a la Tierra, los espectros se desplazan hacia el extremo azul; cuando se alejan, lo hacen hacia el rojo) y llegaron a la conclusión de que la compañera que generaba rayos X era demasiado masiva para ser una

estrella de neutrones o una enana blanca (otra estrella compacta y muy densa, como Sirio B). Si no podía ser ninguna de esas dos y era incluso más masiva que una estrella de neutrones, ¿qué otra cosa podía ser? ¡Un agujero negro, por supuesto! Y eso es lo que propusieron.

No obstante, como buenos científicos experimentales, presentaron sus conclusiones con más prudencia. Louise Webster y Paul Murdin, cuyo descubrimiento apareció en Nature el 7 de enero de 1972, lo explicaron así: «Siendo la masa de la compañera probablemente superior a dos masas solares, es inevitable especular que podría tratarse de un agujero negro». Esto es lo que Tom Bolton escribió un mes más tarde en Nature: «Esto deja abierta la clara posibilidad de que la secundaria [el acretor] sea un agujero negro». En el cuadernillo de fotografías puede verse la imagen de una representación artística de Cyg X-1.

Así que estos maravillosos astrónomos, Webster y Murdin en Inglaterra y Bolton en Toronto, compartieron el descubrimiento de las binarias de rayos X y encontraron el primer agujero negro en nuestra galaxia. (Bolton estaba tan orgulloso que durante unos cuantos años llevó Cyg X-1 como matrícula de su coche.) Siempre he pensado que es raro que nunca recibiesen un premio importante por este descubrimiento absolutamente extraordinario. A fin de cuentas, fueron los primeros en llegar al núcleo de su propio campo: encontraron el primer sistema binario de rayos X. Y dijeron que el acretor era probablemente un agujero negro. ¡Unos fenómenos!

En 1975, nada menos que Stephen Hawking apostó con su amigo y colega el físico teórico Kip Thorne que Cyg X-1 no era en absoluto un agujero negro, a pesar de que por aquel entonces la mayoría de los astrónomos pensaban que sí lo era; quince años después acabó reconociendo que había perdido la apuesta, imagino que para su propio regocijo, ya que gran parte de su trabajo ha girado alrededor de los agujeros negros. La medición más reciente (se publicará en breve) y más precisa de la masa del agujero negro de Cyg X-1 es de unas 15 masas solares (comunicación privada entre Jerry Orosz y mi antiguo alumno Jeff McClintock).

Si eres avispado, sé que estarás pensando: «¡Espera un momento! Acabas de decir que los agujeros negros no emiten nada, que nada puede escapar a su campo gravitatorio, ¿cómo pueden emitir rayos X?». Excelente pregunta, que prometo contestar más adelante, pero aquí va un avance: los rayos X que emite el agujero

negro no provienen del interior del horizonte de sucesos, sino de la materia que se dirige hacia el agujero negro. Aunque la presencia de un agujero negro explicaba nuestras observaciones de Cyg X-1, no podía explicar lo que se veía, en el rango de los rayos X, proveniente de otras estrellas binarias. Hacían falta las estrellas de neutrones binarias, que se descubrieron con el fantástico satélite Uhuru.

La astronomía de rayos X cambió radicalmente en diciembre de 1970, cuando, bajo la dirección de Riccardo Giacconi, entró en órbita el primer satélite dedicado por completo a ella. Lanzado desde Kenia en el decimoséptimo aniversario de la independencia del país, su nombre, Uhuru, significaba «libertad» en swahili.

Con el Uhuru dio comienzo una revolución que aún no ha terminado. Imagina lo que se podía hacer con un satélite: observaciones 365 días al año, 24 horas al día y sin atmósfera. El Uhuru permitía hacer observaciones con las que cinco años antes solo podíamos soñar. En poco más de dos años, el Uhuru trazó un mapa de rayos X del firmamento con contadores capaces de detectar fuentes quinientas veces más débiles que la nebulosa del Cangrejo, diez mil veces más que Sco X-1. Encontró 339 fuentes (hasta entonces solo habíamos detectado varias decenas) y produjo el primer mapa de rayos X de todo el firmamento.

Al liberarnos de los grilletes de la atmósfera, los observatorios espaciales han cambiado nuestra forma de ver el universo, a medida que aprendíamos a observar el espacio exterior —y los asombrosos objetos que contiene— desde todas las zonas del espectro electromagnético. El telescopio espacial Hubble amplió nuestra visión del universo óptico, mientras que un conjunto de observatorios de rayos X hizo lo propio para el universo de rayos X. Los observatorios de rayos gamma analizan ahora el universo a energías todavía más altas.

En 1971, el Uhuru descubrió pulsos de 4,84 segundos provenientes de Cen X-3 (en la constelación de Centaurus). A lo largo de un día, el Uhuru observó un cambio en el flujo de rayos X en un factor diez en alrededor de una hora. El período de los pulsos primero se redujo y después aumentó en alrededor del 0,02 y el 0,04 por ciento, respectivamente, produciéndose cada uno de los cambios en aproximadamente una hora. Todo esto era muy emocionante, pero también muy desconcertante. Los pulsos no podían ser el resultado de una estrella de neutrones en rotación, pues se sabía que sus períodos de rotación eran muy estables. Ninguno

de los púlsares conocidos podía cambiar su período en un 0,04 por ciento en una hora.

El panorama se completó a la perfección cuando el grupo del Uhuru descubrió más tarde que Cen X-3 era un sistema binario con un período orbital de 2,09 días. Los pulsos de 4,84 segundos se debían a la rotación de la estrella de neutrones en acreción. Las evidencias eran abrumadoras. Primero, vieron claramente eclipses periódicos (cada 2,09 días) cuando la estrella de neutrones se escondía tras la estrella donante, bloqueando los rayos X. Y segundo, consiguieron medir el efecto Doppler en los períodos de los pulsos. Cuando la estrella de neutrones se acerca, el período del pulso es algo más corto, y algo más largo cuando se aleja. Estos resultados trascendentales se publicaron en marzo de 1972. Todo esto explicaba de forma natural los fenómenos que parecían tan desconcertantes en el artículo de 1971. Era justo como Shklovski había predicho para Sco X-1: un sistema binario con una estrella donante y una estrella de neutrones en acreción.

Ese mismo año, el grupo de Giacconi encontró una fuente más, Hércules X-1 (o Her X-1, como preferimos llamarlo), con pulsos y eclipses. ¡Otra estrella de neutrones binaria de rayos X!

Fueron descubrimientos completamente asombrosos, que transformaron la astronomía de rayos X y dominaron este campo durante décadas. Las binarias de rayos X son muy raras; quizá solo una de cada cien millones de estrellas binarias lo es. Aun así, ahora sabemos que hay varios cientos de binarias de rayos X en nuestra galaxia. En la mayoría de los casos, el objeto compacto, el acretor, es una enana blanca o una estrella de neutrones, pero se conocen al menos una veintena de sistemas en los que es un agujero negro.

¿Recuerdas la periodicidad de 2,3 minutos que mi grupo descubrió en 1970 (antes del lanzamiento del Uhuru)? Por aquel entonces no teníamos ni idea de qué significaban estos cambios periódicos; hoy sabemos que GX 1+4 es un sistema binario de rayos X con un período orbital de unos 304 días y que la estrella de neutrones en acreción rota con un período de 2,3 minutos.

Binarias de rayos X: cómo funcionan

Cuando una estrella de neutrones se empareja con una donante del tamaño

adecuado y a la distancia correcta, puede producir unos asombrosos fuegos artificiales. En los confines del espacio, estrellas que Isaac Newton no podría siquiera haber imaginado representan una hermosa danza, ajustándose estrictamente en todo momento a las leyes de la mecánica clásica que cualquier estudiante de primer año de universidad puede entender.

Para entenderlo mejor, empecemos más cerca de casa. La Tierra y la Luna forman un sistema binario. Si trazas una línea desde el centro de la Tierra al centro de la Luna, existe un punto sobre ella en el que la fuerza gravitatoria hacia la Luna es igual pero opuesta a la que se dirige hacia la Tierra. Si estuvieses ahí, la fuerza neta que sentirías sería nula. Si estuvieses a un lado de ese punto, caerías hacia la Tierra; si estuvieses al otro lado, caerías hacia la Luna. Ese punto tiene un nombre: punto de Lagrange interno. Evidentemente, está muy cerca de la Luna, porque su masa es unas ochenta veces menor que la de la Tierra.

Volvamos ahora a las binarias de rayos X formadas por una estrella de neutrones en acreción y una estrella donante mucho más grande. Si las dos estrellas se encuentran muy cerca la una de la otra, el punto de Lagrange interno puede encontrarse bajo la superficie de la estrella donante. Si es así, parte de la materia de la estrella donante experimenta una fuerza gravitatoria hacia la estrella de neutrones más fuerte que hacia el centro de la propia donante. Por tanto, la materia —hidrógeno gaseoso caliente— fluirá desde la donante hasta la estrella de neutrones.

Como las estrellas orbitan alrededor de su centro de masas común, la materia no puede caer directamente hacia la estrella de neutrones. Antes de llegar a la superficie, la materia entra en una órbita alrededor de la estrella de neutrones, creando un disco giratorio de gas caliente llamado disco de acreción. Parte del gas en el anillo interior del disco acaba llegando en última instancia a la superficie de la estrella de neutrones.

Aquí interviene una parte interesante de la física que ya has visto en otro contexto. Debido a su elevada temperatura, el gas está ionizado, y por tanto compuesto por protones con carga positiva y electrones con carga negativa. Pero como las estrellas de neutrones crean campos magnéticos muy intensos, estas partículas cargadas se ven obligadas a seguir las líneas del campo magnético, de forma que la mayor parte

de este plasma acaba en los polos magnéticos de la estrella de neutrones, como la aurora boreal en la Tierra. Los polos magnéticos de la estrella de neutrones (adonde llega el plasma) se convierten en puntos calientes, con temperaturas de millones de grados Kelvin, y emiten rayos X. Y como los polos magnéticos en general no coinciden con los polos del eje de rotación (véase el capítulo 12), en la Tierra solo se recibe un flujo intenso de rayos X cuando un punto caliente está orientado hacia aquí. Como la estrella de neutrones gira sobre sí misma, parece que palpita.

En todas las binarias de rayos X hay un disco de acreción que orbita alrededor de la acretora, ya sea esta una estrella de neutrones, una enana blanca o, como en el caso de Cyg X-1, un agujero negro. Los discos de acreción son uno de los objetos más extraordinarios del universo y casi nadie ha oído hablar de ellos, aparte de los astrónomos profesionales.

Hay discos de acreción alrededor de todos los agujeros negros en las binarias de rayos X. Incluso los hay que orbitan alrededor de los agujeros negros supermasivos que se encuentran en el centro de muchas galaxias, aunque es probable que no lo haya en el que existe en el centro de la nuestra.

El estudio de los discos de acreción se ha convertido en todo un campo dentro de la astrofísica[58].

Aún nos queda mucho por saber sobre ellos. Uno de los problemas más embarazosos es que aún no entendemos cómo llega la materia desde el disco de acreción al objeto compacto. Otro de los problemas por resolver es nuestra incapacidad para comprender las inestabilidades en los discos, que dan lugar a variaciones en el flujo de materia hacia el objeto compacto, y la variabilidad en la luminosidad de los rayos X. Tampoco entendemos bien los chorros de ondas de radio que aparecen en varias binarias de rayos X.

Una estrella donante puede transferir hasta unos 1018 gramos por segundo a la estrella de neutrones en acreción. Parece mucho, pero incluso a ese ritmo se tardarían doscientos años en transmitir una cantidad de materia igual a la masa de la Tierra. La materia del disco fluye hacia el centro de la acretora atrapada por su intenso campo gravitatorio, que acelera el gas hasta alcanzar velocidades sumamente altas, aproximadamente un tercio de la velocidad de la luz. La energía

[58] Puedes ver algunas imágenes preciosas en www.google.com/images?hl=en&q=xray+binaries&um=1&ie =UTF

potencial gravitatoria que esta materia libera se convierte en energía cinética (alrededor de 5×10^{30} vatios) y calienta el hidrógeno gaseoso en movimiento a temperaturas de millones de grados.

Ya sabes que cuando la materia se calienta emite radiación del cuerpo negro (véase el capítulo 14). Cuanto más alta es la temperatura, más energía tiene la radiación, lo que significa menores longitudes de onda y mayores frecuencias. Cuando la materia alcanza entre 10 y 100 millones de grados Kelvin, la radiación que genera está compuesta en su mayor parte de rayos X. Casi todos los 5×10^{30} vatios se liberan en forma de rayos X; compara esto con la luminosidad total del Sol (4×10^{26} vatios), de la cual solo alrededor de 10^{20} vatios se emiten en forma de rayos X. La superficie del Sol, en comparación, es un verdadero cubito de hielo.

Las propias estrellas de neutrones son demasiado pequeñas como para que se vean ópticamente, pero sí podemos detectar mediante telescopios ópticos las estrellas donantes, mucho más grandes, y los discos de acreción. Los propios discos irradian una buena cantidad de luz, en parte a causa de un proceso denominado calentamiento por rayos X. Cuando la materia del disco choca con la superficie de la estrella de neutrones, los rayos X resultantes parten en todas las direcciones y, por tanto, también inciden sobre el propio disco, aumentando aún más su temperatura. Añadiré algo más al respecto en el capítulo siguiente, dedicado a las erupciones de rayos X.

El descubrimiento de las binarias de rayos X resolvió el primer misterio de los rayos X extrasolares. Ahora podemos entender por qué la luminosidad de rayos X de una fuente como Sco X-1 es diez mil veces mayor que su luminosidad óptica. Los rayos X provienen de una estrella de neutrones muy caliente (con temperaturas de decenas de millones de grados Kelvin) y la luz óptica viene de la estrella donante y el disco de acreción, mucho más fríos.

Cuando pensábamos que comprendíamos bastante bien cómo funcionaban las binarias de rayos X, la naturaleza nos guardaba otra sorpresa. Los astrónomos de rayos X empezaron a hacer descubrimientos experimentales que se adelantaban a los modelos teóricos.

En 1975, el descubrimiento de algo verdaderamente extraño condujo a un punto álgido de mi carrera científica. Acabé metido de lleno en el intento de observar,

estudiar y explicar estos fenómenos extraordinarios y misteriosos: las erupciones de rayos X.

La historia sobre las erupciones de rayos X incluye la batalla que mantuve con científicos rusos que malinterpretaron completamente sus datos y también con algunos de mis colegas de Harvard, que pensaban que las erupciones de rayos X las producían agujeros negros muy masivos (pobres agujeros negros, se les culpa injustamente de tantas cosas). Aunque cueste creerlo, incluso me exigieron (más de una vez) que no publicase algunos datos por motivos de seguridad nacional.

Capítulo 14

A la caza de los rayos X

La naturaleza está llena de sorpresas y en 1975 una de ellas sacudió la comunidad de los rayos X. La situación llegó a ser tan intensa que hubo momentos en que las emociones se desataron, y yo me encontré en medio de la espiral. Discutí durante años con un colega de Harvard (que no me hacía caso), pero tuve más suerte con mis colegas rusos (que sí lo hicieron). Como tuve un papel importante en todo esto, quizá me cueste ser objetivo, pero ¡lo intentaré!

La última novedad eran las erupciones de rayos X, descubiertas de forma independiente en 1975 por Grindlay y Heise, utilizando datos del Astronomical Netherlands Satellite (ANS) y por Belian, Conner y Evans, a partir de datos de dos satélites espía estadounidenses Vela-5, diseñados para detectar ensayos nucleares. Las erupciones de rayos X eran algo completamente diferente de la variabilidad que habíamos descubierto en Sco X-1, cuyas llamaradas suponían un aumento de la intensidad en un factor cuatro a lo largo de diez minutos, que se prolongaba durante algo menos de una hora. Las erupciones de rayos X eran mucho más rápidas y brillantes y duraban menos de un minuto.

En el MIT disponíamos de nuestro propio satélite (lanzado en mayo de 1975), llamado Third Small Astronomy Satellite, o SAS-3. Su nombre no era tan romántico como «Uhuru», pero fue el proyecto más apasionante de toda mi vida. Habíamos tenido noticia de las erupciones y empezamos a buscarlas en enero de 1976; en marzo ya habíamos encontrado cinco. A finales de año habíamos encontrado un total de diez. Debido a su sensibilidad y a cómo estaba configurado, el SAS-3 resultó ser el instrumento ideal para descubrir y estudiar las fuentes de las erupciones. Evidentemente, no estaba diseñado específicamente para detectar erupciones de rayos X, así que en cierto sentido tuvimos suerte. ¡Ya ves lo importante que ha sido la Diosa Fortuna en mi vida! Estábamos obteniendo datos asombrosos —pepitas de oro que caían del cielo todos los días, veinticuatro horas al día— y yo trabajaba sin descanso. Estaba totalmente entregado, pero también obsesionado. Era la oportunidad de mi vida: tener un observatorio de rayos X que podías apuntar en la dirección que quisieses y con el que obtener datos de alta

calidad.

Lo cierto es que todos nos contagiamos de la «fiebre de las erupciones» —estudiantes de licenciatura y de doctorado, personal de apoyo, investigadores posdoctorales y profesores— y aún recuerdo la sensación de satisfacción. Acabamos en distintos grupos de investigación, lo que significa que nos volvimos competitivos, incluso entre nosotros. A algunos eso no nos gustó, pero debo decir que nos obligó a trabajar más y mejor, y los resultados científicos fueron sencillamente fantásticos.

Tal grado de obsesión no fue bueno para mi matrimonio ni para mi vida familiar. Mi vida científica mejoró enormemente, pero mi primer matrimonio se agotó. Fue culpa mía, desde luego; durante años pasé meses fuera de casa, lanzando globos desde la otra punta del mundo. Ahora que teníamos nuestro propio satélite era como si siguiese en Australia.

Las fuentes de erupciones se convirtieron en una especie de familia de reemplazo. No en vano vivíamos con ellas, dormíamos con ellas y las estudiábamos de cabo a rabo. Como los amigos, cada una era única, con sus propias idiosincrasias. Incluso hoy en día reconozco muchos de los perfiles característicos de las erupciones.

La mayoría de las fuentes estaban a unos 25.000 años luz de distancia, lo que nos permitía calcular que la energía total de rayos X en una erupción (emitida en menos de un minuto) era de unos 1032 julios, un número inconcebiblemente enorme. Compáralo con esto: nuestro Sol tarda alrededor de tres días en emitir 1032 julios de energía en todas las longitudes de onda.

Algunas de estas erupciones llegaban con una regularidad casi matemática, como las de MXB 1659-29, con ciclos de 2,4 horas, mientras que otras se producían a intervalos distintos cada día y otras se pasaban meses enteros sin erupciones. La M en MXB viene de MIT, la X de los rayos X y la B de burster («fuente de erupciones»). El número indica las coordenadas celestes de la fuente en el sistema de coordenadas ecuatorial. A aquellos de vosotros que seáis aficionados a la astronomía os resultará familiar.

La pregunta clave, obviamente, era: ¿cuál es la causa de estas erupciones? Dos de mis colegas de Harvard (incluido Josh Grindlay, uno de los codescubridores de las erupciones de rayos X) se dejaron llevar por su entusiasmo y propusieron en 1976 que las erupciones las producían agujeros negros con masas varios cientos de veces

mayores que la del Sol.

No tardamos en descubrir que los espectros durante las erupciones se parecen a los del enfriamiento del cuerpo negro. Un cuerpo negro no es un agujero negro, sino la idealización de un objeto que absorbe toda la radiación que recibe, en lugar de reflejar parte de ella. (Como sabes, el negro absorbe la radiación mientras que el blanco la refleja; por eso en verano en Miami, en el aparcamiento de la playa, el interior de un coche negro siempre estará más caliente que el de uno blanco.) La otra característica de un cuerpo negro ideal es que, como no refleja nada, la única radiación que emite es la que resulta de su propia temperatura. Piensa en la pieza que se calienta en una cocina eléctrica. Cuando alcanza la temperatura suficiente para cocinar, empieza a tener un brillo rojo y emite luz roja de baja frecuencia; si sigue calentándose, pasa a naranja, después a amarillo y normalmente no llega mucho más allá. Cuando la apagas, se enfría y el perfil de la radiación que emite se aproxima al de la cola final de las erupciones. Conocemos con tanta precisión los espectros de los cuerpos negros que midiendo el espectro a lo largo del tiempo se puede calcular su temperatura a medida que se enfría.

A partir del conocimiento que tenemos de los cuerpos negros, se pueden deducir muchas cosas sobre las erupciones con la física elemental, lo que no deja de ser asombroso. Ahí estábamos, analizando los espectros de emisión de rayos X de fuentes desconocidas a 25.000 años luz de distancia, y realizamos grandes avances utilizando la misma física que mis alumnos de primer año aprenden en el MIT.

Sabemos que la luminosidad total del cuerpo negro (la energía que irradia por segundo) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (algo que no es en absoluto intuitivo) y al área de su superficie (esto sí que lo es: cuanto mayor es el área, más energía puede salir). Así que, si tenemos dos esferas de un metro de diámetro y la temperatura de una es el doble que la de la otra, la primera emitirá dieciséis (24) veces más energía por segundo. Como el área de la superficie de la esfera es proporcional al cuadrado de su radio, también sabemos que, si la temperatura de un objeto se mantiene estable pero su tamaño se triplica, emitirá nueve veces más energía por segundo.

El espectro de rayos X de las erupciones en cualquier instante nos da la temperatura de cuerpo negro del objeto emisor. Durante una erupción, la

temperatura sube rápidamente hasta unos 30 millones de grados Kelvin y después baja lentamente. Como conocemos la distancia aproximada a las fuentes, también podemos calcular su luminosidad en cualquier momento de la erupción. Una vez que conoces su temperatura de cuerpo negro y su luminosidad, puedes calcular el radio del objeto emisor, cosa que se puede hacer para cualquier instante de la erupción. La primera persona que lo hizo fue Jean Swank, del Goddard Space Flight Center de la NASA; nosotros en el MIT lo hicimos poco después y llegamos a la conclusión de que las erupciones provenían del enfriamiento de un objeto cuyo radio era de unos 10 kilómetros. Esta era una prueba contundente de que las fuentes de las erupciones eran estrellas de neutrones y no agujeros negros muy masivos. Y si eran estrellas de neutrones, probablemente también eran binarias de rayos X.

La astrónoma italiana Laura Maraschi estaba de visita en el MIT en 1976 y un día de febrero entró en mi despacho y me sugirió que las erupciones eran el resultado de fogonazos termonucleares, enormes explosiones sobre la superficie de las estrellas de neutrones en acreción. Cuando el hidrógeno se incorpora a una estrella de neutrones, la energía potencial gravitatoria se transforma en un calor tan fuerte que se emiten rayos X (véase el capítulo anterior). Pero a medida que esta materia se acumula en la superficie de la estrella, propuso Maraschi, podría verse sometida a fusión nuclear en un proceso descontrolado (como en una bomba de hidrógeno), lo que podría dar lugar a una erupción de rayos X. La siguiente explosión se produciría unas pocas horas después, una vez que se hubiese acumulado el suficiente combustible nuclear como para que prendiese de nuevo. Maraschi demostró, con un sencillo cálculo en mi pizarra, que la materia que cae hacia la superficie de una estrella de neutrones aproximadamente a la mitad de la velocidad de la luz emite mucha más energía que la que se libera durante las explosiones termonucleares, y eso es lo que los datos mostraban.

Me impresionó; su explicación tenía sentido, las explosiones termonucleares encajaban. El patrón de enfriamiento que habíamos observado durante las erupciones también cuadraba si lo que estábamos viendo era una explosión enorme en una estrella de neutrones. Y su modelo explicaba bien el intervalo entre erupciones, puesto que la cantidad de materia necesaria tardaba un tiempo en acumularse. Al ritmo normal, se tardarían unas pocas horas en alcanzar la masa

crítica, y ese era el intervalo medio que vimos en muchas fuentes de erupciones.

Tengo en mi despacho una extraña radio que siempre desconcierta a las visitas. En su interior tiene una batería solar y solo funciona cuando tiene carga suficiente. Absorbe luz solar, se va cargando poco a poco y cada diez minutos aproximadamente —a veces tarda más, si hace mal tiempo— empieza a sonar de pronto, pero solo durante un par de segundos, porque enseguida consume la electricidad que había acumulado. ¿Lo ves? La batería acumula carga de la misma manera que la estrella de neutrones acumula materia: cuando llega a una cantidad determinada se produce la explosión y después decae.

Varias semanas después de la visita de Maraschi, el 2 de marzo de 1976, en plena fiebre de las erupciones, descubrimos una fuente de rayos X, que bauticé como MXB 1730-335, que producía varios miles de erupciones al día. Era como fuego de ametralladora, ¡algunas a intervalos de solo 6 segundos! No sé si soy capaz de expresar completamente cuánto nos sorprendió. Esta fuente (ahora llamada Rapid Burster)[59] era algo completamente excepcional y liquidó inmediatamente la idea de Maraschi. En primer lugar, no había forma de que en seis segundos se hubiese acumulado en la superficie de una estrella de neutrones una cantidad suficiente de combustible nuclear como para producir una explosión termonuclear. Y no solo eso, sino que, si las erupciones eran consecuencia de la acreción, se debería observar un intenso flujo de rayos X debido únicamente a la acreción (por la liberación de energía potencial) de mucha más energía que las erupciones, cosa que no sucedía. Así que, a principios de marzo de 1976 parecía que el maravilloso modelo termonuclear de las erupciones estaba completamente muerto. En nuestra publicación sobre MXB 1730-335, propusimos que la causa de las erupciones era la «acreción espasmódica» sobre una estrella de neutrones. Es decir, lo que en la mayoría de las binarias de rayos X es un flujo continuo de materia caliente desde el disco de acreción hacia la estrella de neutrones, en el caso de la Rapid Burster es un flujo muy irregular.

Cuando medimos las erupciones durante un tiempo, vimos que, cuanto mayor era la erupción, más había que esperar hasta la siguiente. El tiempo de espera podía ser de tan solo seis segundos o llegar a los ocho minutos. Con los rayos en una

---

[59] Fuente rápida de erupciones. *(N. del T.)*

tormenta sucede algo parecido. Cuando cae un rayo especialmente potente, la magnitud de la descarga implica que será mayor el tiempo de espera hasta que el campo eléctrico vuelva a acumular un potencial capaz de provocar otra descarga.

Ese mismo año, un tiempo después, apareció inesperadamente la traducción de un trabajo ruso de 1975 sobre las erupciones de rayos X; daba cuenta de las detecciones realizadas en 1971 con el satélite Kosmos 428. Estábamos perplejos; los rusos habían descubierto las erupciones de rayos X, ¡y lo habían hecho antes que Occidente! Sin embargo, a medida que fui teniendo más información sobre estas erupciones me volví muy escéptico. Sus erupciones se comportaban de una manera tan distinta de las muchas que había detectado con el SAS-3 que empecé a dudar seriamente de que fuesen reales. Sospechaba que, o bien eran de creación humana, o bien se habían producido cerca de la Tierra de alguna manera extraña. El Telón de Acero impidió salir de dudas; no había forma de averiguarlo. Tuve la suerte de que me invitasen a una conferencia de alto nivel en la Unión Soviética en el verano de 1977. Solo habían sido invitados doce astrofísicos rusos y doce estadounidenses. Fue allí donde conocí por primera vez a los científicos de fama mundial Iósiv Shklovski, Roald Sagdeev, Yakov Zel'dovich y Rashid Sunyaev.

Di una charla sobre —sí, lo has adivinado— erupciones de rayos X y conocí a los autores del trabajo ruso sobre ellas. Tuvieron la amabilidad de mostrarme los datos de muchas erupciones, muchas más de las que habían publicado en 1975. Enseguida me di cuenta de que no tenían ningún sentido, pero no se lo dije, al menos al principio. Antes fui a ver a su jefe, Roald Sagdeev, que por aquel entonces era el director del Instituto de Investigación Espacial de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética en Moscú. Le dije que quería comentar con él un asunto bastante delicado. Él propuso que no lo hiciésemos en su despacho (estaba lleno de micrófonos ocultos), así que fuimos fuera. Le expuse las razones por las que creía que sus erupciones no eran lo que pensaban y me entendió inmediatamente. Le dije que temía que, si yo daba difusión al asunto, podía meterlos en problemas con el régimen soviético. Me aseguró que eso no sucedería y me animó a reunirme con ellos y decirles lo mismo que le acababa de decir a él. Así que lo hice y no se volvió a oír hablar de las erupciones rusas. ¡Me gustaría añadir que seguimos siendo amigos!

Quizá tengas curiosidad por saber qué fue lo que causó estas erupciones rusas. En aquella época no tenía ni idea, pero ahora ya lo sé; fueron obra humana y adivina de quién: ¡los rusos!

Enseguida aclararé el misterio, pero antes volvamos a las erupciones de rayos X reales, que aún estábamos tratando de entender. Cuando los rayos X de las erupciones chocan con el disco de acreción (o con la estrella donante) de una binaria de rayos X, el disco y la estrella se calientan y se iluminan brevemente en la parte óptica del espectro. Como los rayos X habrían tenido que viajar antes hasta el disco y la estrella donante, esperábamos que cualquier fogonazo óptico proveniente del disco nos llegase unos segundos después que la erupción. Así que empezamos a buscar erupciones de rayos X y erupciones ópticas que estuviesen coordinadas. Mi antiguo estudiante de doctorado Jeff McClintock y sus colaboradores habían realizado en 1977 las dos primeras identificaciones ópticas de fuentes de erupciones (MXB 1636-53 y MXB 1735-44) y esas dos fuentes se convirtieron en nuestros objetivos.

¿Entiendes cómo funciona la ciencia? Si un modelo es correcto, tiene que tener consecuencias observables. En el verano de 1977, mi colega y amigo Jeffrey Hoffman y yo organizamos una «búsqueda de erupciones» de rayos X, de radio, ópticas e infrarrojas a escala mundial.

Fue una asombrosa aventura en sí misma. Tuvimos que convencer a astrónomos de cuarenta y cinco observatorios en catorce países para que dedicasen un tiempo precioso durante las horas más propicias (llamadas «período oscuro», cuando la Luna está oculta) a observar una estrella débil (que bien podía no hacer nada). El hecho de que estuviesen dispuestos a participar demuestra la importancia que los astrónomos le daban al misterio de las erupciones de rayos X. Durante treinta y cinco días, con el SAS-3, detectamos 120 erupciones de rayos X provenientes de la fuente MXB 1636-53, pero desde los telescopios terrestres no se detectó ni una. ¡Menuda decepción!

Quizá creas que habríamos tenido que disculparnos ante nuestros colegas de todo el mundo, pero la verdad es que nadie lo vio como un problema. Así funciona la ciencia.

Así que lo intentamos de nuevo al año siguiente, utilizando únicamente grandes

telescopios terrestres. Jeff Hoffman se había ido a Houston para ser astronauta, pero mi alumno de doctorado Lynn Cominsky y el astrónomo holandés Jan van Paradijs (que había venido al MIT en septiembre de 1977) me acompañaron en la búsqueda de erupciones de 1978[60]. Esta vez elegimos MXB 1735-44. La noche del 2 de junio de 1978, ¡lo conseguimos! Josh Grindlay y sus colaboradores (incluido McClintock) detectaron una erupción óptica con el telescopio de 1,5 metros de Cerro Tololo, en Chile, unos segundos después de que nosotros, en el MIT, hubiésemos detectado una erupción de rayos X con el SAS-3. Salimos en la portada de Nature, un gran honor. Este trabajo nos reafirmaba en nuestra convicción de que las erupciones provenían de binarias de rayos X.

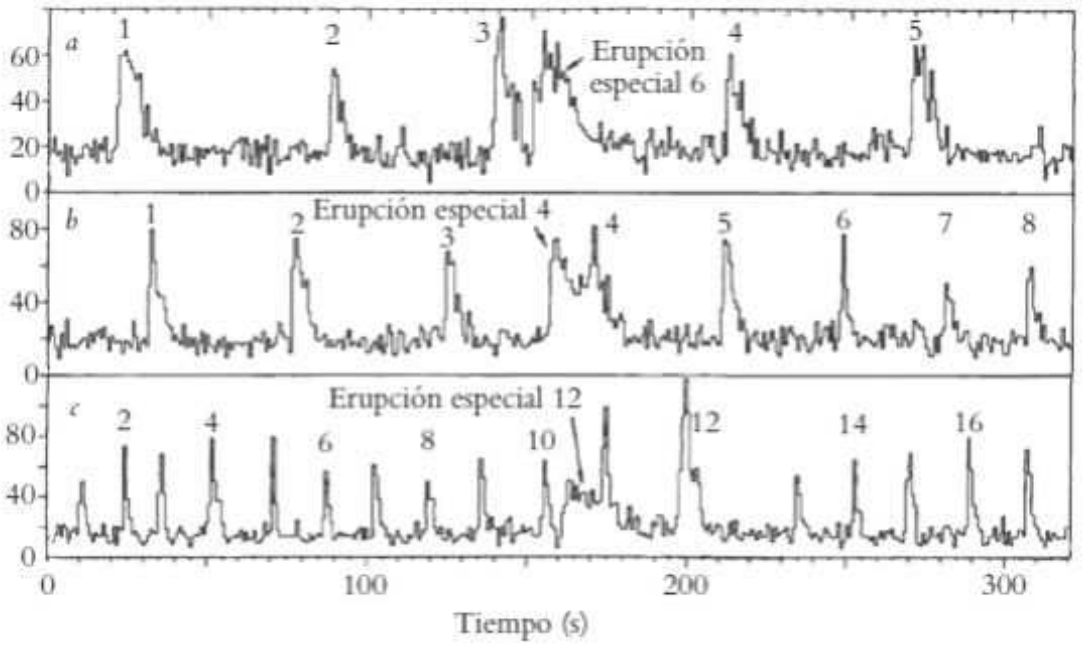
Lo que no sabíamos cómo encajar era por qué todas las fuentes de erupciones, salvo una, producían apenas unas pocas erupciones al día y por qué Rapid Burster era tan diferente. La respuesta estaba en el más maravilloso —y desconcertante— descubrimiento de mi carrera.

La Rapid Burster es lo que llamamos una fuente transitoria, como Cen X-2 (véase el capítulo 11). Pero la Rapid Burster es lo que se llama una transitoria recurrente. En los años setenta entraba en actividad aproximadamente cada seis meses, pero solo durante varias semanas, y después dejaba de emitir.

Alrededor de año y medio después de que descubriésemos la Rapid Burster, nos dimos cuenta de una característica del perfil de sus erupciones que la convirtió en la piedra de Rosetta de las erupciones de rayos X. En el otoño de 1977, cuando la Rapid Burster volvió a entrar en actividad, mi alumno Herman Marshall estudió con detenimiento los perfiles de sus erupciones de rayos X y descubrió un tipo nuevo entre las erupciones muy rápidas, que aparecía con una frecuencia mucho menor, cada tres o cuatro horas. Estas erupciones especiales, como las llamamos al principio, mostraban el mismo perfil de enfriamiento del cuerpo negro que caracterizaba al resto de las fuentes de erupciones. Es decir, quizá lo que llamábamos erupciones especiales —enseguida las llamaríamos erupciones de tipo I y a las erupciones rápidas, erupciones de tipo II— no eran en realidad tan especiales. Las erupciones de tipo II eran claramente el resultado de acreción

[60] No sabía entonces que Jan y yo llegaríamos a ser amigos íntimos y que publicaríamos unos 150 trabajos científicos antes de su muerte prematura en 1999.

espasmódica —de eso nunca hubo ninguna duda—, pero quizá las de tipo I comunes sí que se debían finalmente a fogonazos termonucleares. Enseguida te contaré cómo llegamos a deducirlo, solo te pido un poco de paciencia.



Erupciones de rayos X provenientes de la Rapid Burster detectadas con el SAS-3 en el otoño de 1977. La altura de la línea representa el número de rayos X detectados en aproximadamente un segundo, mientras que el eje horizontal representa el tiempo. Cada franja muestra unos 300 segundos de datos. Las erupciones de tipo II, rápidamente repetitivas, están numeradas de forma secuencial. En cada franja se ve una «erupción especial»; tienen números diferentes. Son las erupciones de tipo I (fogonazos termonucleares). Este gráfico está extraído de Hoffman, Marshall y Lewin, Nature, 16 de febrero de 1978.

En el otoño de 1978, mi colega en el MIT Paul Joss había hecho detallados cálculos sobre la naturaleza de los fogonazos termonucleares en la superficie de las estrellas de neutrones y llegó a la conclusión de que el hidrógeno acumulado primero se fusiona apaciblemente en helio, pero este, cuando alcanza una masa, presión y temperatura críticas, puede explotar violentamente y provocar un fogonazo termonuclear (y, por tanto, una erupción de tipo I). Esto le llevó a predecir que la

energía de rayos X liberada durante la acreción continua debía ser aproximadamente unas cien veces mayor que la emitida en las erupciones termonucleares. Es decir, la energía potencial gravitatoria disponible era alrededor de unas cien veces mayor que la energía nuclear disponible (véase supra).

Medimos la cantidad total de energía emitida en forma de rayos X desde la Rapid Burster durante los cinco días y medio de nuestras observaciones en el otoño de 1977 y vimos que se emitía unas 120 veces más energía en las erupciones de tipo II que en las «especiales» de tipo I. ¡Esa fue la clave! En ese momento supimos que la Rapid Burster era una binaria de rayos X y que las erupciones de tipo I eran resultado de fogonazos termonucleares en la superficie de una estrella de neutrones en acreción y que las de tipo II se debían a la emisión de energía potencial gravitatoria de la materia que fluía desde la estrella donante a la de neutrones. Ya no cabía ninguna duda; desde ese momento, supimos que todas las fuentes de erupciones de tipo I eran binarias de rayos X con estrella de neutrones. Asimismo, teníamos la certeza de que los agujeros negros no podían ser la fuente de las erupciones: puesto que no tienen superficie, no pueden producir fogonazos termonucleares.

Aunque la mayoría de nosotros ya teníamos muy claro en 1978 que las fuentes de las erupciones eran binarias con estrellas de neutrones en acreción, Grindlay, en Harvard, seguía insistiendo en que eran en realidad agujeros negros los que producían las erupciones. Llegó incluso a publicar un trabajo en 1978 en el que intentaba explicar cuál era el proceso por el que agujeros negros muy masivos generaban las erupciones. Ya te he dicho que los científicos pueden llegar a establecer vínculos sentimentales con sus teorías. En el semanario The Real Paper de Cambridge apareció un extenso artículo titulado «Harvard and MIT at the Brink» («Harvard y el MIT, al límite»), con fotos en las que aparecíamos Grindlay y yo.

Las pruebas que demostraban que las fuentes de las erupciones eran de naturaleza binaria llegaron en 1981, cuando mi amigo danés Holger Pederson, Jan van Paradijs y yo descubrimos el período orbital de 3,8 horas de la fuente de erupciones MXB-1636-53. Aun así, Grindlay no aceptó que estaba equivocado hasta 1984.

Así que la fuente de rayos X más extraña, la Rapid Burster, fue la que ayudó a confirmar la teoría de las erupciones normales de rayos X (de tipo I), ya

desconcertantes de por sí. Lo irónico es que, pese a todo lo que permitió explicar, la Rapid Burster ha seguido siendo prácticamente un misterio. No tanto para los físicos experimentales como para los teóricos, para quienes sigue siendo un fastidio. Lo máximo que conseguimos, y en cierto modo lo máximo que hemos sido capaces de hacer nunca, fue llegar a la explicación de la «acreción espasmódica» (sí, ya sé que suena como algo que podrías coger en unas vacaciones exóticas). Y la verdad es que son solo palabras, no es física. De alguna forma, la materia que se dirige hacia la estrella de neutrones es retenida temporalmente en el disco hasta que se separa de él un grumo o un anillo de materia que chorrea hacia la superficie de la estrella, liberando energía potencial gravitatoria en forma de erupciones. Esta emisión se llama inestabilidad del disco, pero vuelven a ser solo palabras; nadie tiene ni idea de por qué ni cómo funciona.

Sinceramente, tampoco entendemos cuál es el mecanismo en el que se basa el comportamiento transitorio recurrente de las fuentes de rayos X. ¿Por qué se encienden y se apagan una y otra vez? No lo sabemos.

Una vez, en 1977, empezamos a percibir erupciones simultáneamente en todos los detectores del SAS-3. Era extraño, porque estaban apuntando hacia direcciones totalmente distintas. La única explicación razonable que se nos ocurrió fue que rayos gamma de muy alta energía estaban atravesando la nave (cosa que los rayos X no pueden hacer) dejando un rastro tras de sí. Como todos los detectores «se dispararon» a la vez, no teníamos ni idea de cuál era la dirección de la que provenían los rayos gamma. Tras observar una docena de episodios como este en un período de varios meses, se detuvieron hasta que, trece meses más tarde, volvieron a empezar. Nadie en el MIT entendía nada.

Con la ayuda de una de mis alumnas, Christiane Tellefson, empecé a catalogar estas erupciones; incluso las clasificamos como A, B y C, dependiendo de sus perfiles. Las almacené todas en un fichero que llamé ERUPCIONES FALSAS.

Recuerdo estar dando una charla ante gente de la NASA (que nos visitaban cada año), contándoles las últimas y emocionantes noticias sobre las erupciones de rayos X y mostrándoles algunas de estas extrañas erupciones. Les expliqué mi poca predisposición a publicar los resultados, porque no me acababan de convencer. Pero me animaron a no retrasar la publicación, así que Christiane y yo empezamos a

escribir un artículo.

Un día, inesperadamente, recibí una llamada de un antiguo alumno mío, Bob Scarlett, que estaba llevando a cabo una investigación secreta en el Laboratorio Nacional de Los Álamos. Me pidió que no publicase nada sobre las extrañas erupciones. Intenté que me diera una explicación, pero no tenía permiso para hacerlo. Me pidió que le dijese las horas a las que habían tenido lugar algunas de las erupciones, y eso hice. Dos días más tarde, me volvió a llamar y esta vez me instó a que no lo publicase por razones de seguridad nacional. Llamé inmediatamente a mi amiga France Córdova, que había trabajado conmigo en el MIT pero por aquel entonces estaba también en Los Álamos. Le comenté mi conversación con Bob, esperando que me diese alguna información sobre lo que estaba pasando. Lo debió de hablar con Bob, porque unos días después también ella me llamó y me dijo que no lo publicase. Para que me quedase tranquilo, me aseguró que esas erupciones no tenían ningún interés astronómico. Resumiendo: no publiqué nada.

Muchos años después supe lo que había pasado: las «erupciones falsas» las habían producido varios satélites rusos alimentados con generadores electronucleares, que contenían fuentes radiactivas muy intensas. Cada vez que el SAS-3 pasaba cerca de uno de estos satélites, regaban nuestros detectores con rayos gamma emitidos por las fuentes radiactivas. ¿Recuerdas esas extrañas erupciones que detectaron los rusos en 1971? Estoy bastante seguro de que también las provocaron los propios satélites rusos… ¡Menuda ironía!

Este período de mi vida, desde finales de la década de 1970 hasta 1995, fue extraordinariamente intenso. La astronomía de rayos X era entonces lo más puntero en astrofísica experimental. Mi implicación con las erupciones de rayos X me condujo a la cumbre de mi carrera científica. Cada año daba una decena de conferencias por todo el mundo, en Europa oriental y occidental, Australia, Asia, América Latina y Oriente Próximo, y a lo ancho y largo de Estados Unidos. Me invitaron a dar charlas en muchas conferencias internacionales de astrofísica y coordiné la edición de tres libros sobre astronomía de rayos X, el último de los cuales, Compact Stellar X-ray Sources, se publicó en 2006.

Y, aun así, a pesar de los asombros avances que hicimos, la Rapid Burster ha resistido todos los intentos de descifrar sus misterios más profundos. Estoy seguro

de que alguien lo conseguirá algún día, y entonces tendrán que enfrentarse a su vez a algo igual de desconcertante. Eso es lo que me encanta de la física, y la razón por la que, bien a la vista en mi despacho del MIT, tengo un póster con los perfiles de las erupciones de la Rapid Burster. Tanto en el Gran Colisionador de Hadrones como en los confines a los que llega el campo ultraprofundo del Hubble, los físicos están obteniendo cada vez más datos e ideando teorías cada vez más ingeniosas. Lo único que sé es que, sea lo que sea lo que encuentren, propongan y teoricen, descubrirán aún más misterios. En física, más respuestas conducen a más preguntas todavía.

Capítulo 15

Formas de ver

La mayoría de los alumnos de secundaria y de universidad odian las clases de física, porque suele explicarse como un complicado conjunto de fórmulas matemáticas. Yo no utilizo ese enfoque ni en el MIT ni en este libro. Presento la física como una forma de ver el mundo, que revela territorios que, de otra forma, estarían ocultos, desde las más diminutas partículas subatómicas a la inmensidad del universo. La física nos permite ver las fuerzas invisibles que actúan a nuestro alrededor, desde la gravedad al electromagnetismo, y estar atentos para ver no solo arcos iris, sino también halos, arcos de niebla y glorias, e incluso quizá arcos de cristal.

Cada físico precursor ha cambiado nuestra forma de ver el mundo. Después de Newton, podíamos entender y predecir los movimientos de todo el sistema solar, y disponíamos de las matemáticas —el cálculo— para hacerlo. Después de Newton, nadie podía afirmar que la luz solar no estaba compuesta por colores, o que los arcos iris no se debían a la refracción y la reflexión de la luz solar en las gotas de lluvia. Desde Maxwell, la electricidad y el magnetismo están para siempre unidos: incluso me ha costado separarlos en capítulos diferentes en este libro.

Por eso existe para mí una fascinante relación entre el arte y la física; el arte innovador es también una nueva forma de ver, una nueva forma de mirar el mundo. Quizá te sorprenda saber que durante gran parte de mi vida he estado casi tan obsesionado con el arte moderno como con la física; ¡estoy enamorado de los dos! Ya he mencionado mi extensa colección de Fiestaware. También he ido acumulando más de cien obras de arte —cuadros, collages, esculturas, alfombras, sillas, mesas, muñecos, máscaras— desde mediados de la década de 1960; ya no me queda sitio en casa, ni en el suelo ni en las paredes, para mostrarlas todas.

En mi despacho en el MIT predomina la física, aunque tengo dos grandes obras de arte, prestadas por la universidad. Pero en casa solo tengo una decena de libros de física y unos doscientos cincuenta de arte. Tuve la suerte de que me enseñaran desde niño a amar el arte.

Mis padres coleccionaban arte, aunque sabían muy poco al respecto desde un punto de vista intelectual. Simplemente se guiaban por lo que les gustaba, lo que podía

conducirles a callejones sin salida. A veces elegían grandes obras, y otras veces obras no tan buenas, o al menos eso parece a posteriori. Un cuadro que me impresionó mucho fue un retrato de mi padre, que ahora cuelga sobre mi chimenea en Cambridge. Es realmente imponente. Mi padre era todo un personaje (y testarudo, como yo). El artista, que lo conocía muy bien, lo plasmó magníficamente, de cintura para arriba, con su cabeza grande, calva y alargada entre sus hombros altos y fuertes y una sonrisa de satisfacción en su pequeña boca. Pero lo que realmente destaca son sus gafas: gruesas, negras, esbozando unos ojos invisibles que te siguen por la habitación, mientras su ceja izquierda se arquea burlona sobre la montura. Así era su personalidad: penetrante.

Mi padre me llevaba a galerías de arte y a museos cuando yo estaba en secundaria y fue entonces cuando me empecé a enamorar realmente del arte, porque me enseñaba nuevas formas de ver. Me encantaba que en las galerías y los museos, al contrario que en el instituto, te guiabas por tus propios intereses, deteniéndote cuando querías, permaneciendo el tiempo que te parecía oportuno, continuando cuando te venía en gana. Establecías tu propia relación con el arte. Enseguida empecé a ir a museos por mi cuenta y poco después ya había adquirido cierto bagaje. Me sumergí en Van Gogh. (Ya sabes que su nombre en realidad se pronuncia fan Joj; prácticamente imposible si no eres holandés, dos guturales apenas separadas por un sonido «o» corto.) Con quince años, acabé dando una charla sobre él en clase. A veces llevaba a mis amigos de excursión a los museos. Así que en realidad fue el arte el que me condujo hacia la enseñanza.

Fue entonces cuando conocí por primera vez la maravillosa sensación que se experimenta al enseñar a otros —tengan la edad que tengan—a ampliar sus mentes hacia nuevos territorios. Es una verdadera lástima que el arte pueda parecer tan oscuro y difícil como la física le resulta a tanta gente que ha tenido malos profesores. Este es uno de los motivos por los que durante los últimos ocho años me he entretenido poniendo cada semana una pregunta sobre arte en mi tablón de anuncios del MIT; una imagen que imprimo de la red, con la pregunta «¿Quién es el artista?». Reparto premios —libros de arte bien bonitos— a los tres participantes que aciertan más veces a lo largo del año. Algunos de los habituales se pasan horas rastreando la red y al hacerlo ¡aprenden de arte! Me gustó tanto la idea de la

pregunta semanal que ahora planteo una cada dos semanas en mi página de Facebook. Si quieres, puedes tratar de responderlas.

También he tenido la suerte de poder colaborar a lo largo de mi vida con algunos fantásticos artistas de vanguardia. A finales de la década de 1960, el «artista del cielo» alemán Otto Piene vino al MIT becado por el Center for Advanced Visual Studies, que acabó más tarde dirigiendo durante dos décadas. Como entonces yo ya había lanzado varios de mis globos gigantes, le ayudé con algunas de sus obras de arte del cielo. El primer proyecto en el que trabajamos juntos se llamaba Light Line Experiment, y consistía en cuatro tubos de polietileno de 75 metros rellenos de helio que, cuando se sujetaban al suelo por cada extremo, formaban unos hermosos arcos mecidos por las brisas primaverales en las instalaciones deportivas del MIT. Atamos los cuatro tubos juntos para formar un globo de 300 metros y dejamos que un extremo se elevase hacia el cielo. Por la noche, iluminamos con focos partes de los globos serpenteantes, que se retorcían y se agitaban dibujando hermosas formas que cambiaban continuamente, a decenas de metros de altura. ¡Era fabuloso!

Normalmente, mi trabajo en estos proyectos era técnico: decidir si se podían llevar a la práctica las ideas que Otto tenía sobre los tamaños y las formas de los globos. Por ejemplo, cuál tenía que ser el grosor del polietileno. Queríamos que fuese lo suficientemente ligero como para que se elevase, pero que resistiese las embestidas del viento. En 1974, en un evento en Aspen, en Colorado, colgamos cuentas de cristal talladas con múltiples caras de las cuerdas de una «tienda de luz». Hice muchos cálculos sobre los diferentes tamaños de los globos y los pesos de las cuentas para llegar a una solución factible, tanto física como estéticamente. Me encantó trabajar en la física que hacía posibles las ideas artísticas de Otto.

Me impliqué mucho en Rainbow, el enorme globo de cinco colores que diseñó para la ceremonia de clausura de los Juegos Olímpicos de Munich de 1972. Por supuesto, no teníamos ni idea de que los Juegos acabarían de una forma tan desastrosa, con la matanza de los atletas israelíes, de forma que nuestro Rainbow, con sus 450 metros y elevándose a más de 150 metros de altura sobre el mar olímpico, se convirtió en un símbolo de esperanza en mitad de la tragedia. En el cuadernillo se puede ver una fotografía del globo Rainbow. Cuando empecé a lanzar globos para

explorar el universo, nunca imaginé que acabaría trabajando en proyectos como este.

Otto me presentó al artista holandés Peter Struycken, cuya obra yo conocía bien porque mis padres la habían coleccionado en los Países Bajos. Otto me llamó un día al MIT y me dijo: «Está aquí en mi despacho un artista holandés, ¿te gustaría conocerlo?». La gente siempre da por supuesto que, por ser del mismo pequeño país, nos gustaría charlar, pero lo más habitual es que a mí no me apetezca. Le dije a Otto: «¿Por qué habría de interesarme? ¿Cómo se llama?». Cuando me dijo «Peter Struycken» por supuesto que accedí, pero, para no arriesgarme, le dije a Otto que solo tenía media hora (lo cual no era cierto). Así que Peter vino a mi despacho; estuvimos hablando durante casi cinco horas (¡sí, cinco horas!) y después le invité a ostras en el Legal Sea Foods[61]. Conectamos desde el principio y Peter fue durante más de veinte años uno de mis amigos más queridos. ¡Esa visita cambió mi vida para siempre!

Durante nuestra primera conversación, conseguí que Peter «viera» por qué su problema/pregunta más importante («¿Cuándo es una cosa diferente de otra?») dependía por completo de la definición de diferencia que uno utilizase. Para algunos, un cuadrado es distinto de un triángulo y también de un círculo. Sin embargo, si defines como una misma cosa todas las líneas geométricas cerradas en sí mismas, estas tres formas son una misma cosa.

Peter me mostró una decena de dibujos a ordenador, todos hechos con el mismo programa, y me dijo: «Todos son lo mismo». A mí me parecían muy diferentes. Todo depende de la definición de «lo mismo» de cada uno. Le dije que si para él todos eran iguales, quizá podía dejarme uno. Lo hizo, y escribió en él, en holandés, Met dan voor een gesprek («*En agradecimiento por una conversación*»). Esto era propio de Peter: discreción extrema. Sinceramente, de todos los Struyckens que tengo, este pequeño dibujo es mi favorito.

Peter había encontrado en mí a un físico que no solo estaba interesado en el arte, sino que le podía ayudar en su trabajo. Él es uno de los pioneros en todo el mundo en el arte por ordenador. En 1979, Peter (con Lien y Daniel Dekkers) vino durante un año al MIT y empezamos a colaborar muy estrechamente. Nos veíamos casi a

[61] Una marisquería en Cambridge, Massachusetts, donde reside el autor. *(N. del T.)*

diario y cenaba en su casa dos o tres veces a la semana. Antes de conocer a Peter, yo «miraba» el arte; él me enseñó a «verlo».

Sin él, creo que nunca habría aprendido a centrarme en las obras innovadoras, a entender cómo pueden transformar de un modo fundamental nuestra manera de ver el mundo. Aprendí que el arte no trata únicamente, ni siquiera principalmente, sobre la belleza, sino sobre el descubrimiento, y es aquí donde para mí confluyen el arte y la física.

Desde entonces, empecé a mirar el arte de una forma muy diferente. Ya no me importaba qué era lo que «me gustaba»; lo relevante era la calidad artística, la nueva forma de mirar el mundo, y eso solo se puede valorar si realmente sabes algo de arte. Empecé a fijarme en las fechas de realización de las obras. Las obras de arte pioneras de Malévich de entre 1915 y 1920 son fascinantes. Cuadros similares que otros artistas pintaron en los años treinta no me interesan. «El arte es plagio o revolución», decía Paul Gauguin con su típica arrogancia, pero hay algo de cierto en ello.

Me fascinaba la evolución que conducía a las obras innovadoras. Por ejemplo, enseguida fui capaz de decir con precisión de qué año era una obra de Mondrian —su evolución entre 1900 y 1925 es asombrosa— y lo mismo puede hacer ahora mi hija Pauline. A lo largo de los años, más de una vez me he dado cuenta de que los museos a veces se equivocan en las fechas de los cuadros. Cuando se lo señalo a los comisarios (cosa que siempre hago), a veces les pongo en un brete, pero siempre las cambian.

Trabajé con Peter en una docena de ideas suyas. Nuestro primer proyecto fue 16th Space, arte en dieciséis dimensiones (fuimos más allá de las once dimensiones de la teoría de cuerdas). También recuerdo sus series Shift. Había desarrollado la base matemática para un programa de ordenador que generaba arte muy complejo e interesante, pero como no sabía demasiadas matemáticas sus ecuaciones eran extrañas, verdaderamente absurdas. Quería que las matemáticas fuesen bellas, pero no sabía cómo hacerlo.

Conseguí dar con una solución, cuya física no era nada complicada: ondas viajeras en tres dimensiones. Puedes elegir la longitud de onda, fijar la velocidad de las ondas e indicar su dirección. Y si quieres que tres ondas se atraviesen entre sí,

también puedes hacerlo. Comienzas con unas condiciones iniciales, dejas que las ondas se atraviesen y las sumas, lo que produce patrones de interferencia muy interesantes.

Las matemáticas en las que se basaban eran muy hermosas, algo muy importante para Peter. No pretendo pavonearme, sé que él habría dicho lo mismo. Es el papel que he desempeñado casi siempre en su vida: el de mostrarle cómo hacer que las cosas fuesen matemáticamente bellas y fáciles de entender. Con gran gentileza, siempre me dejaba escoger una obra de cada serie. ¡Vaya suerte la mía, tengo unos trece Struyckens!

Como resultado de mi colaboración con Peter, el director del Museo Boijmans van Beuningen de Rotterdam me invitó a dar la primera Conferencia Mondrian en 1979 bajo la enorme cúpula de la iglesia Koepelkerk de Amsterdam. Estaba lleno a reventar; había unas novecientas personas. Esta prestigiosa conferencia tiene lugar cada dos años. En 1981, el conferenciante fue Umberto Eco, Donald Judd en 1993, Rem Koolhaas en 1995 y Charles Jencks en 2010.

Mis colaboraciones con Otto y con Peter no han sido mis únicas incursiones en el arte; una vez intenté (en broma) crear arte conceptual yo mismo. En la charla titulada «Looking at 20th-Century Art Through the Eyes of a Physicist»[62], expliqué que en casa tengo una docena de libros sobre física y al menos doscientos cincuenta de arte, así que la proporción es aproximadamente de veinte a uno. Puse diez libros de arte sobre la mesa e invité al público a que les echase un vistazo en el intermedio. Para mantener la proporción correcta, dije que pondría también medio libro de física. Esa mañana, había cortado un libro de física en dos, justo por la mitad del lomo. Así que lo mostré, señalando que lo había cortado con mucho cuidado; era realmente medio libro. «Para aquellos de ustedes a los que no les interese el arte —dije, dejándolo caer sonoramente sobre la mesa—, ¡aquí tienen!» Me temo que nadie lo cogió.

Si volvemos la vista atrás, desde el arte de la época del Renacimiento hasta nuestros días hay una tendencia clara. Los artistas han ido liberándose progresivamente de las limitaciones que les imponían las tradiciones imperantes: limitaciones sobre el tema que se podía tratar, sobre la forma, los materiales, la

[62] «El arte del siglo XX visto a través de los ojos de un físico»; http://mitworld.mit.edu/speaker/ view/55

perspectiva, la técnica y el color. A finales del siglo XIX, los artistas abandonaron por completo la idea del arte como una representación del mundo natural.

Lo cierto es que ahora muchas de esas obras innovadoras nos parecen magníficas, pero la intención de los artistas era bien distinta: querían incorporar una nueva forma de mirar el mundo. Muchas de las obras que hoy admiramos como creaciones icónicas y bellas, como La noche estrellada de Van Gogh o el Retrato de la raya verde de Matisse (un retrato de su mujer), fueron objeto de mofa y rechazo en su época. Los adorados impresionistas —Monet, Degas, Pissarro, Renoir—, que hoy figuran entre los artistas más populares de cualquier museo, también tuvieron que hacer frente a las burlas cuando empezaron a exponer sus obras.

El hecho de que ahora sus obras nos parezcan hermosas a la mayoría de nosotros demuestra que los artistas se impusieron a su época: su nueva forma de ver, su nueva forma de mirar el mundo, se ha convertido en nuestro mundo, en nuestra forma de ver. Lo que hace cien años era simplemente feo ahora puede ser bello. Me encanta recordar que un crítico de la época calificó a Matisse como el apóstol de la fealdad. El coleccionista Leo Stein se refirió a su cuadro de madame Matisse, Mujer con sombrero, como «la más repulsiva mancha de pintura que he visto jamás», pero ¡lo compró!

En el siglo XX, los artistas utilizaban los objetos que encontraban; a veces algunos muy sorprendentes, como el retrete de Marcel Duchamp (que llamó «fuente») y su Mona Lisa, sobre la que escribió las provocativas siglas LHOOQ[63]. Duchamp fue el gran liberador; tras él ¡cualquier cosa valía! Quería zarandear nuestra forma de mirar el arte.

Nadie puede mirar el color de la misma manera tras Van Gogh, Gauguin, Matisse y Derain. Como tampoco puede nadie mirar igual un bote de sopa Campbell o una imagen de Marilyn Monroe después de Andy Warhol.

Las obras de arte innovadoras pueden ser bellas, incluso impresionantes, pero lo más habitual —desde luego, al principio— es que sean desconcertantes, e incluso feas. La verdadera belleza de una obra de arte innovadora, independientemente de lo fea que sea, está en su significado. Una nueva forma de mirar el mundo nunca es

---

[63] En francés, la pronunciación de los nombres de esta serie de letras es homófona de la frase *Elle a chaud au cul*, que significa literalmente «Ella tiene el culo caliente», pero que en sentido figurado puede también entenderse como «Ella está excitada sexualmente». *(N. del T.)*

una cama familiar y acogedora; es siempre una ducha bien fría. Para mí esa ducha es estimulante, tonificante, liberadora.

Pienso lo mismo de los trabajos pioneros en física. Cada vez que la física da otro de sus extraordinarios pasos reveladores en un terreno previamente invisible o tenebroso, ya nunca podemos volver a ver el mundo de la misma forma.

Los múltiples y asombrosos descubrimientos que he presentado en este libro fueron en su momento profundamente desconcertantes. Aprender las matemáticas en las que se basan sería demasiado exagerado. Pero espero que mi introducción de algunos de los mayores avances te haya permitido sentir lo emocionantes y hermosos que son. De la misma manera que Cézanne, Monet, Van Gogh, Picasso, Matisse, Mondrian, Malévich, Kandinsky, Brancusi, Duchamp, Pollock y Warhol abrieron nuevos caminos que supusieron un reto para el mundo del arte, Newton y todos los que vinieron tras él nos proporcionaron una nueva visión.

Los pioneros en la física de principios del siglo XX —entre ellos, Antoine Henri Becquerel, Marie Curie, Niels Bohr, Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Enrico Fermi— propusieron ideas que chocaban completamente con la forma en que los científicos habían pensado sobre la realidad durante siglos, incluso milenios. Antes de la mecánica cuántica, creíamos que una partícula era una partícula, que obedece las leyes de Newton, y una onda era una onda, que se rige por una física diferente. Ahora sabemos que todas las partículas pueden comportarse como ondas, y viceversa. Así, el problema del siglo XVIII de si la luz era una partícula o una onda (que parecía haber sido resuelto en 1801 por Thomas Young a favor de la onda; véase el capítulo 5) ha dejado de serlo hoy en día, puesto que es las dos cosas.

Antes de la mecánica cuántica se creía que la física era determinista, en el sentido de que, si haces el mismo experimento cien veces, obtendrás exactamente el mismo resultado las cien veces. Ahora sabemos que no es así. La mecánica cuántica trabaja con probabilidades, no con certezas. Esto era tan sorprendente que incluso Einstein nunca llegó a aceptarlo. «Dios no juega a los dados», fueron sus famosas palabras. ¡Pues Einstein se equivocó!

Antes de la mecánica cuántica creíamos que la posición de una partícula y su momento (que es el producto de su masa y su velocidad) podían, en principio,

determinarse simultáneamente con un grado de precisión arbitrario. Eso era lo que nos habían enseñado las leyes de Newton. Ahora sabemos que no es así. Por poco intuitivo que resulte, cuanto mayor sea la precisión con que se determina su posición, menos precisa será la determinación de su momento; es el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg.

Einstein afirmó en su teoría de la relatividad especial que el espacio y el tiempo constituían una realidad tetradimensional, el espacio-tiempo. Postuló que la velocidad de la luz era constante (300.000 kilómetros por segundo). Incluso si una persona se acercase hacia ti en un tren superrápido a la mitad de la velocidad de la luz (150.000 kilómetros por hora), apuntándote con un faro, tanto ella como tú obtendríais el mismo valor para la velocidad de la luz. Esto no es en absoluto intuitivo, ya que pensarías que, puesto que el tren se acerca hacia ti y la luz parte de él también en tu dirección, habría que sumar 300.000 y 150.000, lo que daría una velocidad de 450.000 kilómetros por hora. Pero no es así. Según Einstein, 300.000 más 150.000, ¡siguen siendo 300.000! Su teoría de la relatividad general era quizá incluso más increíble, al ofrecer una reinterpretación completa de la fuerza que mantiene unido el universo astronómico y afirmar que la gravedad distorsiona el propio tejido del espacio-tiempo, haciendo que los cuerpos orbiten por geometría, incluso obligando a que la luz se arquee al atravesar ese espacio-tiempo distorsionado. Einstein demostró que la física newtoniana necesitaba una revisión importante y abrió el camino hacia la cosmología moderna: el big bang, el universo en expansión y los agujeros negros.

Cuando empecé a dar clase en el MIT en los años setenta, por mi personalidad yo hacía más énfasis en la belleza y la emoción que en los detalles que los alumnos de todas formas olvidarían. En cada tema sobre el que he dado clase, siempre he intentado, cuando me ha sido posible, ponerlo en relación con el propio mundo de los alumnos, y hacerles ver cosas sobre las que nunca habían pensado pero que tenían al alcance de la mano. Cada vez que los alumnos me hacen una pregunta, les digo: «Excelente pregunta». Lo último que quieres es que sientan que son estúpidos y tú muy listo.

Llega un momento en mi curso sobre electricidad y magnetismo que valoro mucho. Durante gran parte del semestre, hemos estado acechando, una por una, las

ecuaciones de Maxwell, las descripciones asombrosamente elegantes de la relación entre la electricidad y el magnetismo, distintos aspectos del mismo fenómeno, el electromagnetismo. Hay una belleza intrínseca en la manera que estas ecuaciones se comunican entre sí que resulta increíble. No puedes separarlas; juntas forman una teoría de campos unificada.

Así que proyecto estas cuatro hermosas ecuaciones en distintas pantallas en todas las paredes de la sala de conferencias. «Miradlas —les digo—. Aspiradlas. Dejad que penetren en vuestros cerebros. Esta será la primera y la única vez en la vida en que seréis capaces de apreciar las cuatro ecuaciones de Maxwell en todo su esplendor, hablando entre ellas. No volverá a suceder. No volveréis a ser los mismos. Habéis perdido la virginidad.» En honor de este día trascendental en las vidas de los alumnos, como forma de celebrar la cumbre intelectual que han alcanzado, llevo seiscientos narcisos, uno para cada alumno.

Los alumnos me siguen escribiendo muchos años después, cuando ya hace mucho tiempo que han olvidado las ecuaciones de Maxwell, para decirme que recuerdan el día de los narcisos, el día que marqué con flores su nueva forma de ver. Para mí esto es la cumbre de la enseñanza. Es mucho más importante para mí que los alumnos recuerden la belleza de lo que vieron que el hecho de que sean capaces de reproducir lo que escribí en la pizarra. ¡Lo que cuenta no es de lo que hablas, sino lo que descubres!

Mi objetivo es conseguir que les guste la física y que miren el mundo de una manera diferente, ¡eso es para toda la vida! Amplías sus horizontes, lo que les permite plantearse preguntas que nunca antes se habían hecho. Lo importante es descubrirles el mundo de la física de tal forma que conecte con sus intereses reales. Por eso siempre intento mostrar a mis alumnos el bosque, en lugar de hacer que suban y bajen a cada uno de los árboles. Eso es también lo que he intentado hacer contigo en este libro. Espero que hayas disfrutado con el recorrido.

Apéndice 1

Los fémures de los mamíferos

Es razonable suponer que la masa de un mamífero es proporcional a su volumen. Comparemos un cachorro con un perro adulto, que es cuatro veces más grande. Estoy dando por supuesto que todas las dimensiones lineales del adulto son cuatro veces mayores que las del cachorro (su altura, su longitud, el grosor y la longitud de sus patas, la anchura de su cabeza, todo). Si es así, el volumen (y, por tanto, la masa) del perro adulto es unas sesenta y cuatro veces la del cachorro.

Una forma de verlo es tomando un cubo de aristas a, b y c, cuyo volumen es entonces $a \times b \times c$. Si se cuadruplica cada una de sus aristas, el volumen pasa a ser $4a \times 4b \times 4c$, es decir, $64abc$. Si lo expresamos de una forma algo más formal, podemos decir que el volumen (y, por tanto, la masa) del mamífero es proporcional a su longitud elevada al cubo. Si el perro adulto es cuatro veces más grande que el cachorro, su volumen debería ser 4 al cubo (4^3), es decir, 64 veces mayor. Así que, si «l» es la longitud del fémur, al comparar mamíferos de distintos tamaños sus masas deberían ser aproximadamente proporcionales a l al cubo (l^3).

Eso en cuanto a la masa. La resistencia del fémur del mamífero que soporta todo ese peso tiene que ser proporcional a su grosor, ¿no? Los huesos más gruesos son capaces de soportar más peso, es algo intuitivo. Si expresamos esta idea en términos matemáticos, la resistencia del fémur debe ser proporcional a la superficie de su sección transversal. Dicha superficie es aproximadamente circular y sabemos que el área de un círculo es πr^2, siendo r su radio. Por tanto, el área es proporcional a d^2, donde d es el diámetro del círculo.

Llamemos «d» (de diámetro) al grosor del fémur. Entonces, según Galileo, la masa del mamífero sería proporcional a d^2 (de forma que los huesos puedan soportar el peso del mamífero), pero también, independientemente de lo que pensase Galileo, es proporcional a l^3. Así que, si Galileo estaba en lo cierto, d^2 debería ser proporcional a l^3, que equivale a decir que d debería ser proporcional a $l^3/2$.

Si se comparan dos mamíferos, uno de los cuales es cinco veces más grande que el otro (y, por tanto, la longitud l de su fémur es unas cinco veces mayor que la del

más pequeño), cabe esperar que el grosor de su fémur, *d*, sea 53/2 = 11 veces mayor que el del mamífero más pequeño. En clase demostré que la longitud de un fémur de elefante era unas 100 veces mayor que la del de un ratón; entonces, si la idea de Galileo es correcta, cabría esperar que el grosor del fémur de elefante sea unas 1003/2 = 1.000 veces mayor que el del fémur de ratón.

Por lo tanto, en algún momento, en el caso de mamíferos muy pesados, el grosor de sus huesos debería ser igual a su longitud, lo que daría como resultado unos mamíferos muy poco viables. Esa sería la razón por la que existe un límite para el tamaño de los mamíferos.

Apéndice 2

Las leyes de Newton en funcionamiento

La ley universal de la gravedad de Newton puede escribirse así:

$$F_{grav} = G\frac{m_1 m_r}{r^2} \quad [1]$$

donde F_{grav} es la fuerza de atracción gravitatoria entre un objeto de masa m_1 y otro de masa m_2 y *r* es la distancia entre ellos. *G* es la llamada constante de gravitación universal.

Las leyes de Newton permitían calcular, al menos en principio, la masa del Sol y de algunos planetas.

Veamos cómo. Empezaré por el Sol. Supongamos que m_1 es la masa del Sol y que m_2 es la de un planeta cualquiera. Supondré también que la órbita planetaria es un círculo de radio *r* y que el período orbital es *T* (que será de 365 días para la Tierra, 88 días para Mercurio y casi doce años para Júpiter).

Si la órbita es circular o casi circular (lo cual es cierto para cinco de los seis planetas que se conocían en el siglo XVII), la magnitud de la velocidad del planeta en órbita es constante, pero su dirección cambia continuamente. Si la dirección de la velocidad cambia, aunque no varíe su magnitud, debe existir una aceleración y, por tanto, según la segunda ley de Newton, debe haber una fuerza que la produzca.

Es la llamada fuerza centrípeta (F_c), que apunta siempre en la dirección que va desde el planeta hacia el Sol. Evidentemente, como Newton era Newton, sabía exactamente cómo calcular esta fuerza (en mis clases deduzco la ecuación). Su magnitud es:

$$F_c = \frac{m_2 v^2}{r} \quad [2]$$

donde v es la velocidad del planeta en órbita. Pero esta velocidad es igual a la circunferencia de la órbita, $2\pi r$, dividida entre el tiempo, T, que el planeta tarda en dar una vuelta completa alrededor del Sol. Por tanto, se puede escribir igualmente:

$$F_c = \frac{4\pi^2 m_2 r}{r} \quad [3]$$

¿De dónde proviene esta fuerza? ¿Cuál es su origen? Newton se dio cuenta de que debía de ser la fuerza de atracción gravitatoria del Sol. Por tanto, las dos fuerzas en las ecuaciones de más arriba son la misma, es decir:

$$F_{grav} = F_c \quad [4]$$

Si sustituimos los valores de cada una de ellas y recolocamos las variables (es tu ocasión de refrescar el álgebra de secundaria), obtenemos para la masa del Sol:

$$m_1 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad [5]$$

Como puedes ver, la masa del planeta (m_2) ya no aparece en la ecuación 5; no interviene; todo lo que se necesita es la distancia media del planeta al Sol y su período orbital (T). ¿No te parece sorprendente? Al fin y al cabo, m_2 aparece en la ecuación 1 y también en la 2. Pero el hecho de que figure en ambas es

precisamente la razón de que se elimine al igualar F_{grav} y F_c. Ahí está la gracia de este método, y todo se lo debemos a sir Isaac.

La ecuación 5 muestra que r^3/T^2 es igual para todos los planetas, a pesar de que todos están a distancias muy distintas del Sol y sus períodos orbitales también son muy diferentes. El astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler ya había llegado a este asombroso resultado en 1619, mucho antes que Newton. Pero entonces no se entendía en absoluto por qué esta proporción —entre el cubo del radio y el cuadrado del período orbital— era constante. Fue el genio de Newton el que demostró, sesenta y ocho años después, que era una consecuencia natural de sus leyes.

En resumen, la ecuación 5 nos dice que si conocemos la distancia entre cualquier planeta y el Sol (r), su período orbital (T) y G, podemos calcular la masa del sol (m_1).

Los períodos orbitales se conocían con un alto grado de precisión mucho antes del siglo XIX. Las distancias entre el Sol y los planetas también eran conocidas con mucha precisión antes del siglo XVII, pero solo de forma relativa. Es decir, los astrónomos sabían que la distancia media del Sol a Venus era un 72,4 por ciento de la que había a la Tierra y que la distancia media a Júpiter era 5.200 veces mayor que la de la Tierra. Sin embargo, los valores absolutos no se conocían bien. En el siglo XVI, en la época del gran astrónomo danés Tycho Brahe, los astrónomos creían que la distancia entre la Tierra y el Sol era unas veinte veces menor de la real (casi 150 millones de kilómetros). A principios del siglo XVII, Kepler obtuvo un valor más ajustado para la distancia al Sol, pero seguía siendo siete veces menor de la que existe en realidad.

Como la ecuación 5 indica que la masa del Sol es proporcional a la distancia (a un planeta) al cubo, si la distancia es demasiado pequeña en un factor siete, la masa obtenida será demasiado baja en un factor 73, es decir, 343, lo cual no tiene ninguna utilidad.

En 1672 se produjo un importante avance, cuando el científico italiano Giovanni Cassini midió la distancia entre la Tierra y el Sol con un error del 7 por ciento (algo impresionante para la época), lo que significaba que la imprecisión en r^3 era de solo el 22 por ciento. La imprecisión para G era probablemente de al menos el 30 por

ciento. Así que supongo que a finales del siglo XVII se conocía el valor de la masa del Sol con una precisión de, como mucho, el 50 por ciento.

Como las distancias relativas entre el Sol y los planetas se conocían con un alto grado de precisión, el hecho de saber el valor de la distancia entre la Tierra y el Sol con un error del 7 por ciento significaba que, a finales del siglo XVII, las distancias a los otros cinco planetas se podían calcular con esa misma precisión del 7 por ciento de error.

El método anterior para calcular la masa del Sol también puede utilizarse para calcular las masas de Júpiter, Saturno y la Tierra. Se sabían que estos tres planetas tenían lunas que orbitaban a su alrededor; en 1610 Galileo Galilei descubrió cuatro lunas de Júpiter, que hoy se conocen como satélites galileanos. Si m_1 es la masa de Júpiter y m_2 la de uno de sus satélites, se puede calcular la masa de Júpiter por medio de la ecuación 5, de la misma manera que hemos calculado la masa del Sol, teniendo en cuenta que ahora *r* es la distancia entre Júpiter y su satélite, y que *T* es el período orbital de dicho satélite alrededor de Júpiter. Los cuatro satélites galileanos (¡Júpiter tiene en total sesenta y tres lunas!) tienen períodos orbitales de 1,77, 3,55, 7,15 y 16,69 días, respectivamente.

La precisión con que se conocían las distancias y el valor de *G* mejoró mucho con el tiempo. A finales del siglo XIX, el valor de *G* se conocía con una precisión del 1 por ciento de error. Hoy en día, el margen de error es del 0,01 por ciento.

Déjame que te ponga un ejemplo numérico. Usando la ecuación 5, calculemos juntos la masa de la Tierra (m_1) utilizando la órbita de la Luna (con masa m_2). Para hacerlo correctamente, la distancia *r* debe estar en metros y *T* en segundos. Si tomamos $6{,}673 \times 10^{-11}$ como valor de *G*, obtenemos la masa en kilogramos.

La distancia media a la Luna (*r*) es de $3{,}8440 \times 10^8$ metros; su período orbital (*T*) es de $2{,}3606 \times 10^6$ segundos (27,32 días). Si introducimos estos números en la ecuación 5, obtenemos para la masa de la Tierra un valor de $6{,}030 \times 10^{24}$ kilogramos. Actualmente, el valor más preciso de la masa de la Tierra es $5{,}974 \times 10^{24}$ kilogramos, ¡solo un 1 por ciento menor que el que hemos calculado! ¿A qué se debe la diferencia? Una razón es que la ecuación que hemos utilizado supone que la órbita de la Luna es circular, cuando en realidad es alargada, es decir, elíptica. Por tanto, la menor distancia a la Luna es de unos 360.000 kilómetros, y la mayor, de

unos 405.000. Evidentemente, las leyes de Newton también se pueden aplicar fácilmente a órbitas elípticas, pero las matemáticas te dejarían alucinado. Puede que ya lo sepas.

Hay otra razón por la que nuestro resultado se desvía algo del valor de la masa de la Tierra. Hemos supuesto que la Luna órbita alrededor de la Tierra y que el centro de la órbita es el centro de la Tierra. Por lo tanto, en las ecuaciones 1 y 3 hemos asumido que *r* es la distancia entre la Tierra y la Luna. Eso es correcto para la ecuación 1; sin embargo, como expongo con más detalle en el capítulo 13, tanto la Luna como la Tierra en realidad orbitan alrededor del centro de masas del sistema Luna-Tierra, que está situado unos 1.600 kilómetros por debajo de la superficie terrestre. Por lo tanto, el valor de r en la ecuación 3 es algo menor que en la ecuación 1.

Como vivimos en la Tierra, tenemos otras formas de calcular la masa de nuestro planeta. Una pasa por medir la aceleración gravitatoria cerca de su superficie. Cuando cae, cualquier objeto de masa *m* (el valor de m es arbitrario) experimenta una aceleración, *g*, de casi 9,82 metros por segundo al cuadrado[64]. El radio medio de la Tierra es de unos $6{,}371 \times 10^6$ metros.

Volvamos ahora a la ecuación 1 de Newton. Como $F = ma$ (segunda ley de Newton), entonces:

$$G\frac{m_{tierra}m}{r^2} = mg \qquad [6]$$

donde *r* es el radio de la Tierra. Con $G = 6{,}673 \times 10^{-11}$, g = 9,82 metros por segundo al cuadrado y $r = 6{,}371 \times 10^6$ metros, podemos calcular m_{tierra} en kilogramos (¡inténtalo tú!). Si simplificamos un poco la ecuación 6, obtenemos:

$$m_{tierra} = \frac{gr^2}{G} \qquad [7]$$

[64] Esta aceleración, dicho sea de paso, es un 0,18 por ciento más baja en el ecuador que en los polos, porque la Tierra no es una esfera perfecta. Los objetos en el ecuador están unos 20 kilómetros más lejos del centro de la Tierra que en los polos, por lo que *g* es menor en el ecuador. 9,82 es un valor promedio.

Obtenemos como resultado que m_{tierra} es 5,973 × 10^{24} kilogramos (impresionante, ¿verdad?).

Fíjate en que la masa, m, del objeto que dejamos caer no aparece en la ecuación 7. No debería sorprenderte, porque la masa de la Tierra no tendría que depender en modo alguno de la masa del objeto que cae.

Quizá también te interese saber que Newton creía que la densidad media de la Tierra era de entre 5.000 y 6.000 kilogramos por metro cúbico. Este valor no se basaba en información astronómica; era completamente independiente de cualquiera de sus leyes. De hecho, la densidad media de la Tierra es de 5.540 kilogramos por metro cúbico. Si me permites que escriba la estimación de Newton como 5.500 ± 500 kilogramos por metro cúbico, vemos que su error era solo del 10 por ciento (¡asombroso!).

No sé si alguien se tomó en serio la estimación de Newton en su época, aunque supongo que sí. Como en el siglo XVII el valor del radio terrestre era bien conocido, se podía haber calculado la masa de la Tierra con un error del 10 por ciento (la masa es el volumen multiplicado por la densidad). Se podría utilizar la ecuación 7 para calcular entonces el valor de *G* con la misma precisión. Te digo esto porque estoy intrigado por saber si, aceptando la estimación de Newton para la densidad media de la Tierra, desde finales del siglo XVII se podía haber calculado el valor de la constante de gravitación, G, con un error del 10 por ciento.

Agradecimientos

Sin la inteligencia, la previsión, el olfato para los negocios y el apoyo moral de nuestra excepcional agente literaria, Wendy Strothman, *Por amor a la física* no habría pasado de ser una quimera. Ella nos juntó, le puso título al libro y le encontró un hogar en Free Press, leyó numerosos borradores con su ojo aguzado por sus años como editora y nos ayudó a centrarnos en el producto final. Somos también afortunados y agradecidos destinatarios de su leal amistad, que nos mantuvo a flote a lo largo del proyecto.

Sería difícil exagerar las aportaciones de nuestra editora, Emily Loose, de Free Press, cuya visión para este libro se reveló contagiosa y cuya atención extraordinariamente minuciosa a la prosa narrativa fue muy instructiva para ambos. A pesar de la enorme presión que existe en la industria editorial para reducir costes por cualquier medio, Emily se empeñó en editar de verdad este libro, siempre llevándonos hacia una mayor claridad, unas transiciones más suaves y una mayor concreción. Su habilidad y energía han hecho un libro mucho mejor. También queremos agradecer a Amy Ryan su avezada revisión del manuscrito.

Walter Lewin

Todos los días recibo preciosos y, a menudo, emocionantes correos electrónicos de decenas de personas de todo el mundo que ven mis clases en la red. Estas clases fueron posibles gracias a la visión de Richard «Dick» Larson. En 1998, cuando era director del Center for Advanced Educational Services y profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica del MIT, propuso que mis clases, bastante poco convencionales, se grabasen en vídeo y se pusiesen a disposición de estudiantes ajenos al MIT. Recibió para ello una importante financiación de la Lord Foundation de Massachusetts y de Atlantic Philanthropies. ¡La iniciativa de Dick fue precursora del e-learning! Cuando el OpenCourseWare del MIT abrió sus puertas en 2001, mis clases llegaron a todos los confines del mundo y ahora las ven al año más de un millón de personas.

El 19 de diciembre de 2007 aparecí en la primera página del New York Times en un artículo de Sara Rimer con el siguiente titular: «*A los setenta y un años, un profesor de física se convierte en estrella en la red*», lo que provocó una sucesión de acontecimientos que desembocó en este libro. ¡Gracias, Sara!

Durante los últimos dos años, incluso durante los setenta días que pasé en el hospital (cuando estuve a punto de morir), siempre tuve este libro en la cabeza. En casa, hablaba de él constantemente con mi mujer Susan Kaufman. Muchas noches me impedía dormir. Susan lo soportó pacientemente y fue capaz de subirme el ánimo. También revisó algunos de los capítulos con su astuto ojo editorial, mejorándolos notablemente.

Tengo mucho que agradecer a mi prima Emmie Arbel-Kallus y a mi hermana, Bea Bloksma-Lewin, por compartir conmigo algunos de sus dolorosos recuerdos de lo que vivieron durante la Segunda Guerra Mundial. Soy consciente de lo difícil que esto ha debido de ser para ellas dos, como lo fue también para mí. Le agradezco a Nancy Stieber, mi querida amiga desde hace treinta años, sus continuas correcciones de mi inglés y sus inestimables comentarios y sugerencias. También quiero darle las gracias a mi amigo y colega George Clark, sin el cual yo nunca habría llegado a ser profesor en el MIT. George me dejó leer la propuesta original que la American Science and Engineering remitió a los Laboratorios de Investigación de las Fuerzas Aéreas en Cambridge, que condujo al nacimiento de la astronomía de rayos X.

Quiero dar las gracias asimismo a Scott Hughes, Enectali Figueroa-Feliciano, Nathan Smith, Alex Filippenko, Owen Gingerich, Andrew Hamilton, Mark Whittle, Bob Jaffe, Ed van den Heuvel, Paul Murdin, George Woodrow, Jeff McClintock, John Belcher, Max Tegmark, Richard Lieu, Fred Rasio, John Huchra (ya fallecido), Jeff Hoffman, Watti Taylor, Vicky Kaspi, Fred Baganoff, Ron Remillard, Dan Kleppner, Bob Kirshner, Amir Rizk, Chris Davlantes, Christine Sherratt, Mark Bessette, Markos Hankin, Bil Sanford y Andrew Neely por ayudarme siempre que fue necesario.

Por último, no puedo agradecerle lo suficiente a Warren Goldstein su paciencia conmigo y su flexibilidad; a veces se debe de haber sentido abrumado (y quizá frustrado) con tal cantidad de física en tan poco tiempo.

Warren Goldstein

Quiero agradecer a las siguientes personas su predisposición a hablar conmigo sobre Walter Lewin: Laura Bloksma, Bea Bloksma-Lewin, Pauline Broberg-Lewin, Susan Kaufman, Ellen Kramer, Wies de Heer, Emanuel «Chuck» Lewin, David Pooley, Nancy Stieber y Peter Struycken. Aunque no se les cite explícitamente en Por amor a la física, cada uno de ellos ha contribuido en buena medida a que yo entendiese a Walter Lewin. Edward Gray, Jacob Harney, Laurence Marschall, James McDonald y Bob Celmer hicieron todo lo que estuvo en sus manos para evitar que Walter y yo cometiésemos errores en sus respectivos campos de especialidad; aunque preferiríamos poder descargarla en ellos, asumimos la plena responsabilidad por los posibles errores que aún puedan existir. También quiero dar las gracias a William J. Leo, de la promoción de 2011 de la Universidad de Hartford, por su ayuda en un momento crítico. Tres de los escritores más inteligentes que conozco —Marc Gunther, George Kannar y Lennard Davis— me dieron inestimables consejos al principio del proyecto. Cada uno a su manera, Joseph Voelker, decano, y Fred Sweitzer, ayudante del rector de la Universidad de Hartford, me permitieron encontrar tiempo para terminar este libro. Estoy profundamente agradecido a mi mujer, Donna Schaper —extraordinaria asistenta y organizadora, y autora de más de treinta libros— por comprender y celebrar mi inmersión en un mundo ajeno. Nuestro nieto, Caleb Benjamin Luria, llegó a este mundo el 18 de octubre de 2009; ha sido maravilloso verle llevar a cabo sus propios experimentos de física cotidiana. Por último, quiero dejar constancia de mi profunda gratitud a Walter Lewin, que me enseñó más física en los últimos años de lo que cualquiera de los dos habría imaginado que era posible y reavivó en mí una pasión que había estado latente demasiado tiempo.